



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.*  
**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



# MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DIFUSAS DE GAS EN UN VERTEDERO

Trabajo realizado por:

*Nicolás Chávez Ramírez*

Dirigido:

*Amaya Lobo García de Cortázar*

*Mónica Delgado Salgado*

Titulación:

**Grado en Ingeniería Civil,  
Mención en Construcciones Civiles**

Santander, octubre de 2020

**TRABAJO FIN DE GRADO**



A mis padres y abuelas,  
Por su amor y apoyo incondicional.



## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mis agradecimientos a todas aquellas personas que han contribuido en mi formación, tanto personal como profesional. Gracias por el tiempo, apoyo y conocimiento entregado, el cual ha sido fundamental para lograr llegar hasta aquí.

A mis padres y hermano, Susan, Marcelo y Lukas, por el amor, apoyo y confianza depositada en mí durante este largo camino, por estar incondicionalmente a mi lado en cada una de mis decisiones y guiarme día a día a ser una mejor persona.

A mis abuelas, Nancy y Salomé, por su inmenso amor y apoyo incondicional.

A mis amigos y amigas, por recorrer este largo camino a mi lado, por el apoyo y aprendizaje que cada uno me ha dado.

A mis profesoras guías, Amaya Lobo y Mónica Delgado, por la oportunidad y la confianza de trabajar a su lado, por su tiempo, dedicación y enseñanzas durante el desarrollo de este trabajo.

## **RESUMEN**

Actualmente, naciones de todo el mundo tratan de controlar el calentamiento global provocado por los gases de efecto invernadero (GEI), siendo los vertederos uno de los principales focos de emanación de este tipo de gases. Los GEI están formados, principalmente, por metano y dióxido de carbono, siendo el primero el que tiene un mayor potencial de efecto invernadero, por lo tanto, suele ser el foco de atención en los estudios sobre vertederos.

El gas de vertedero es también conocido como biogás debido a que es mayoritariamente generado a partir de reacciones biológicas de descomposición de residuos orgánicos. Conocer el potencial de este gas que emana desde un vertedero puede traer múltiples beneficios, tanto para la captación como en su posterior aprovechamiento. Si bien existe diversa bibliografía con respecto a estimación de metano, cada vertedero tiene singularidades que podrían afectar el cálculo y las cantidades de gas emitidas.

El presente trabajo, forma parte de un proyecto acordado entre la Universidad de Cantabria y la empresa gestora de un vertedero de residuos sólidos urbanos ubicado en el norte de España, inaugurado el año 1989 y aún en explotación. El objetivo principal es crear un modelo tomando como base uno ya existente, que permita estimar las emisiones de biogás que el vertedero arroja al entorno, utilizando los datos históricos que se poseen sobre los residuos depositados desde su apertura y con base en la bibliografía científica disponible. Se trata de mejorar el modelo actual, que sobreestima lo que realmente sucede en el vertedero.

El modelo elaborado ha tomado como principal referencia el modelo de descomposición de primer orden propuesto por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), pero utilizando los nuevos conocimientos disponibles para integrar en él mismo parámetros y modificaciones que permitan adecuarlo específicamente al vertedero en estudio. Junto con el modelo elaborado (modelo GIA), se ha fabricado una herramienta de cálculo que permite enlazar el modelo, los diferentes parámetros y las acciones realizadas en la gestión del vertedero en un solo instrumento, lo cual ha permitido un trabajo rápido y eficiente al momento de agregar nuevas modificaciones.

Con el fin de comprobar los resultados de la estimación, se han realizado campañas de medición de emisiones superficiales de metano en el vertedero, permitiendo comparar los valores obtenidos de estimación realizada mediante el modelo elaborado con las cantidades de metano que realmente están siendo emitidas a la atmósfera.

La campaña realizada durante la ejecución del presente trabajo corresponde a la quinta de al menos ocho campañas planificadas. Esta fue realizada en dos visitas durante el mes de julio de 2020 y constó de la medición de 68 puntos, entregando como resultado emisiones anuales equivalentes a 814 toneladas al año, resultados similares a los obtenidos en las cuatro campañas anteriores.

Gracias al modelo elaborado, y tomando como referencia el año 2019, se logró reducir la desviación que se tenía al estimar las emisiones del vertedero, el cual ronda aproximadamente las 6.268 toneladas de metano al año. La estimación con el nuevo modelo disminuye hasta las 1.791 toneladas al año utilizando el modelo GIA, lo que significa una mejora en la estimación de aproximadamente 71%.

Por último, se presenta un análisis de sensibilidad de los parámetros y del impacto de las decisiones tomadas en la gestión del vertedero a lo largo de su vida útil sobre la estimación de emisiones difusas de biogás. Esto ha arrojado como resultado que el parámetro Factor de Cobertura Final, parámetro que fue agregado en este trabajo y que no fue considerado por la propuesta del IPCC, es uno de los que más ha provocado cambios ha provocado en la estimación, disminuyendo en un 46% los resultados obtenidos inicialmente.

Conocer esta información permite tener una importante referencia a la hora de tomar decisiones futuras en el trabajo a realizar en el tiempo que queda de proyecto, ya que se puede apuntar a mejorar o estudiar detalladamente aquellos parámetros o modificaciones que presentan mayor sensibilidad y así lograr mejorar el modelo elaborado.

Palabras clave: vertedero, estimación de emisiones, metano, biogás, modelización.

## **ABSTRACT**

Currently, nations around the world try to control global warming caused by greenhouse gases (GHG), with landfills being one of the main sources of emission of this type of gases. GHGs are mainly made up of methane and carbon dioxide, the former being the one with the greatest potential for greenhouse effect, therefore it is often the focus of attention in landfill studies.

Landfill gas is also known as biogas because it is mainly generated from biological reactions of decomposition of organic waste. Knowing the potential of this gas that emanates from a landfill can bring multiple benefits, both for the capture and its subsequent use. Although there is diverse literature regarding methane estimation, each landfill has singularities that could affect the calculation and the amounts of gas emitted.

This work is part of a project agreed between the University of Cantabria and the management company of a solid urban waste landfill located in the north of Spain, inaugurated in 1989 and still in operation. The main objective is to create a model based on an existing one, which allows estimating the biogas emissions that the landfill discharges into the environment, using the historical data on the waste deposited since its opening and based on the available scientific literature. It is about improving the current model, which overestimates what actually happens in the landfill.

The model developed has taken as its main reference the first-order decomposition model proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), but using the new available knowledge to integrate parameters and modifications that allow it to be specifically adapted to the landfill under study. Together with the elaborated model (GIA model), a calculation tool has been manufactured that allows linking the model, the different parameters and the actions carried out in the management of the landfill in a single instrument, which has allowed a quick and efficient work when time to add new modifications.

In order to verify the results of the estimation, campaigns have been carried out to measure surface emissions of methane in the landfill, allowing the comparison of the values obtained from the estimate made using the model developed with the quantities of methane that are actually being emitted into the atmosphere.

The campaign carried out during the execution of this work corresponds to the fifth of at



least eight planned campaigns. This was carried out in two visits during the month of July 2020 and consisted of the measurement of 68 points, resulting in annual emissions equivalent to 814 tons per year, results similar to those obtained in the four previous campaigns.

Thanks to the model developed, and taking 2019 as a reference, it was possible to reduce the deviation that was had when estimating emissions from the landfill, which is around 6,268 tons of methane per year. The estimate with the new model decreases to 1,791 tons per year using the GIA model, which means an improvement in the estimate of approximately 71%.

Finally, a sensitivity analysis of the parameters and the impact of the decisions made in the management of the landfill throughout its useful life is presented on the estimation of diffuse emissions of biogas. This has resulted in the Final Coverage Factor parameter, a parameter that was added in this work and that was not considered by the IPCC proposal, is one of those that has caused the most changes in the estimate, decreasing by 46 % the results obtained initially.

Knowing this information allows you to have an important reference when making future decisions in the work to be done in the remaining time of the project, since you can aim to improve or study in detail those parameters or modifications that present greater sensitivity and thus achieve improvement the elaborated model.

Keywords: landfill, emissions estimation, methane, biogas, modeling.



## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	DESCRIPCIÓN DEL VERTEDERO	3
2.1.	RESIDUOS ACEPTADOS	5
2.2.	CLIMA	7
3.	METODOLOGÍA DE CAMPAÑA DE MEDICIÓN	8
3.1.	EQUIPOS DE MEDIDA	8
3.2.	PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN	10
3.3.	TRABAJO DE GABINETE	12
4.	METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE BIOGÁS	16
4.1.	MODELO IPCC	17
4.2.	MODELO GIA	25
4.3.	HERRAMIENTA DE CÁLCULO	32
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
5.1.	RESULTADOS DE CAMPAÑA DE MEDICIONES	37
5.2.	RESULTADOS DE ESTIMACIÓN DE BIOGÁS	42
5.3.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	45
6.	TRABAJO FUTURO	51
7.	CONCLUSIÓN	52
8.	REFERENCIAS	55
9.	ANEJOS	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zonificación del vertedero a modo orientativo ( <i>fuentes: GIA, 2019a</i> )	4
Figura 2. Composición de residuos año 2019.	6
Figura 3. Fracción rechazo de bioestabilización v/s total de residuos.	7
Figura 4. Equipo LaserOne marca HUBERG ( <i>fuentes: Direct Industry, n.d.</i> )	9
Figura 5. Cámara de flujo estática ( <i>fuentes: GIA, 2019b</i> )	10
Figura 6. Zonificación del vertedero según potencial de emisión superficial y mallado propuesto para distribución de puntos de medida ( <i>fuentes: GIA, 2019b</i> )	11
Figura 7. Punto de medición con cámara de flujo.	12
Figura 8. Punto de medición sin cámara flujo.	12
Figura 9. Grafica de HotSpot de la quinta campaña.	13
Figura 10. Flujo de gas de HotSpot de la quinta campaña.	14
Figura 11. Nota de campo de HotSpot de la quinta campaña.	14
Figura 12. Grafica incluida en el informe de la campaña 5.	15
Figura 13. Imagen de punto incluida en informe campaña 5.	16
Figura 14. Árbol de decisión para emisiones de vertedero ( <i>fuentes: Pipatti et al., 2006</i> )	18
Figura 15. Clasificación de residuos en herramienta de cálculo.	33
Figura 16. Sistema de desgaseificación en herramienta de cálculo.	34
Figura 17. Parámetros de biodegradabilidad utilizados en el modelo GIA.	35
Figura 18. Otros parámetros utilizados en el modelo GIA.	35
Figura 19. Emisiones de metano estimadas con el modelo GIA.	36
Figura 20. Localización de los puntos medidos en la campaña de julio 2020. ( <i>fuentes: GIA, 2020</i> )	38
Figura 21. Puntos de muestreo de emisiones en la Zona de explotación. ( <i>fuentes: GIA, 2020</i> )	39
Figura 22. Grafica de resultados de la generación de metano estimada con el modelo GIA ( <i>fuentes: GIA, 2020</i> )	43

Figura 23. Grafica de resultados de emisión de metano estimada con el modelo GIA (*fuentes: GIA, 2020*) 44

Figura 24. Grafica de resultados de recuperación de biogás estimada con el modelo GIA (*fuentes: GIA, 2020*) 45

Figura 25. Grafica comparativa de los resultados de la estimación de metano emitido entre el modelo inicial y su última versión. 49

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valor de parámetro DOC propuestos por el IPCC ( <i>fuentes: IPCC, 2006</i> )	21
Tabla 2. Valor de índice de generación de metano (k) por defecto en el IPPC (2006) ( <i>fuentes: Pipatti et al., 2006</i> )	23
Tabla 3. Valores del parámetro MCF en función del tipo de vertedero en IPPC (2006) ( <i>fuentes: Pipatti et al., 2006</i> )	23
Tabla 4. Valores de aquellos puntos que exceden los límites de referencia para la zona en explotación ( <i>fuentes: GIA, 2020</i> )	40
Tabla 5. Flujo de emisión de los puntos medidos en el Vertedero Antiguo. ( <i>fuentes: GIA, 2020</i> )	40
Tabla 6. Flujo de emisión de los puntos medidos en la Zona sin explotar. ( <i>fuentes: GIA, 2020</i> )	41
Tabla 7. Flujo de emisión de los puntos medidos en el Talud de cierre. ( <i>fuentes: GIA, 2020</i> )	41
Tabla 8. Emisiones superficiales obtenidas en la quinta campaña al vertedero ( <i>fuentes: GIA, 2020</i> )	42
Tabla 9. Comparación de resultados de estimación de emisiones entre las diferentes versiones del modelo GIA.	47
Tabla 10. Comparación entre mediciones de campo y estimaciones de metano utilizando el modelo inicial y su versión más actualizada.	50

## 1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global es uno de los problemas medioambientales con peores consecuencias para nuestro planeta, por ello, en los últimos años, la reducción de los denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI) ha sido el principal foco de actuación de los expertos. Uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global es el metano ( $\text{CH}_4$ ), este provoca alrededor de un tercio del calentamiento global antropogénico (Sánchez et al., 2016). Este gas, forma parte importante del gas proveniente de vertedero, es por esto que es necesario invertir esfuerzos en controlar el destino final de los residuos generados y su posterior gestión en el depósito.

Generalmente, los restos de vegetales, animales muertos y sus excrementos, se descomponen en la naturaleza en contacto con el oxígeno que se encuentra en el aire. A esto se le conoce como degradación aerobia, en la cual actúan microorganismos que consumen oxígeno en su metabolismo. Esta degradación biológica produce dióxido de carbono y vapor de agua durante el proceso, además de un aumento de temperatura debido al actuar de los microorganismos (González, 1997).

Sin embargo, dentro de un vertedero, la degradación de la materia se produce en ausencia del oxígeno del aire, es decir, ocurre en condiciones anaerobias. En esta situación, los microorganismos que actúan también son anaerobios y su actividad, además de ir acompañada de un menor aumento de temperatura, produce una mezcla gaseosa combustible que se compone, principalmente, por metano, dióxido de carbono y vapor de agua e hidrógeno (González, 1997). Esta mezcla gaseosa es conocida como biogás, o también llamada gas de vertedero y sus emisiones representan entre un 3 y 4% de todo el gas de efecto invernadero (Pipatti et al., 2006).

El biogás o gas de vertedero, está compuesto por un 50% - 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) y un 30% - 50% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Schroth et al., 2011). Siendo el metano considerado el segundo gas de efecto invernadero más perjudicial para el planeta, solo detrás del  $\text{CO}_2$ , pero con un potencial 25 veces mayor que este último (Sánchez et al., 2016). Incluso, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) no considera al  $\text{CO}_2$  como un gas de efecto invernadero ya que, al ser considerado “biogénico” es una parte natural del ciclo del carbono.

Naturalmente, el biogás puede salir del vertedero a través de dos vías, la migración hacia un

subsuelo contiguo y/o atravesando el sistema de cobertura del vertedero. En ambos casos, al no existir un sistema de captura o control de gases, este logrará salir a la atmósfera. Es por esto, que es importante dimensionar la cantidad de biogás que se estará generando y emitiendo desde un vertedero, para lograr implementar medidas que permitan controlar las emisiones de gas a la atmósfera y a su vez, disminuir las problemáticas mencionadas inicialmente.

El presente trabajo forma parte de un proyecto más amplio que estudia las emisiones difusas de biogás provenientes de vertederos. El proyecto lleva alrededor de 2 años de desarrollo, años en los que se han realizado diversas campañas de medición de emisiones difusas en terreno, además de avances en la modelización para la estimación de las mismas. Específicamente, este trabajo estudia la generación de biogás en un vertedero controlado de residuos sólidos urbanos (RSU) específico ubicado en el norte de España y tiene como objetivo general la elaboración de un modelo matemático de cálculo que permita estimar el potencial de generación y emisión de biogás en aquel vertedero y así, dar paso a soluciones en la gestión del mismo. Para esto, se han fijado los siguientes objetivos específicos. Primero, describir el vertedero en estudio y los diferentes parámetros necesarios para introducir al modelo. Segundo, incluir soluciones y mejoras, al modelo que actualmente se utiliza para estimar las emisiones difusas de biogás en el vertedero en estudio, acompañándolo de una herramienta de cálculo que permita la sencilla aplicación del modelo elaborado y así simular las cantidades de metano generado y emitido al entorno. En tercer lugar, realizar campañas de medida de emisiones difusas en el vertedero en estudio y así cuantificar en terreno lo que realmente está sucediendo. Finalmente, se pretende analizar los resultados obtenidos tanto de la estimación de emisiones, como de la cuantificación de estas en terreno, para posteriormente compararlos y tomar las decisiones pertinentes con respecto al modelo fabricado, y así, ser el punto inicial de futuras investigaciones y propuestas tecnológicas, tanto en la generación, captación y posterior aprovechamiento de biogás.



## 2. DESCRIPCIÓN DEL VERTEDERO

El vertedero objeto de estudio pertenece al tipo “vertedero controlado”, se encuentra ubicado al norte de España y fue inaugurado en el año 1988, desde su creación ha sufrido diversas modificaciones en su geometría debido a los cambios en la planificación urbanística de la comunidad. Los diferentes tipos de residuos que se depositan en el vertedero corresponden a residuos sólidos urbanos (RSU), lodos de estación depuradora de agua residual (EDAR) y rechazo final procedente de los procesos de pretratamiento (productos recuperados y bioestabilizado) y de valorización energética.

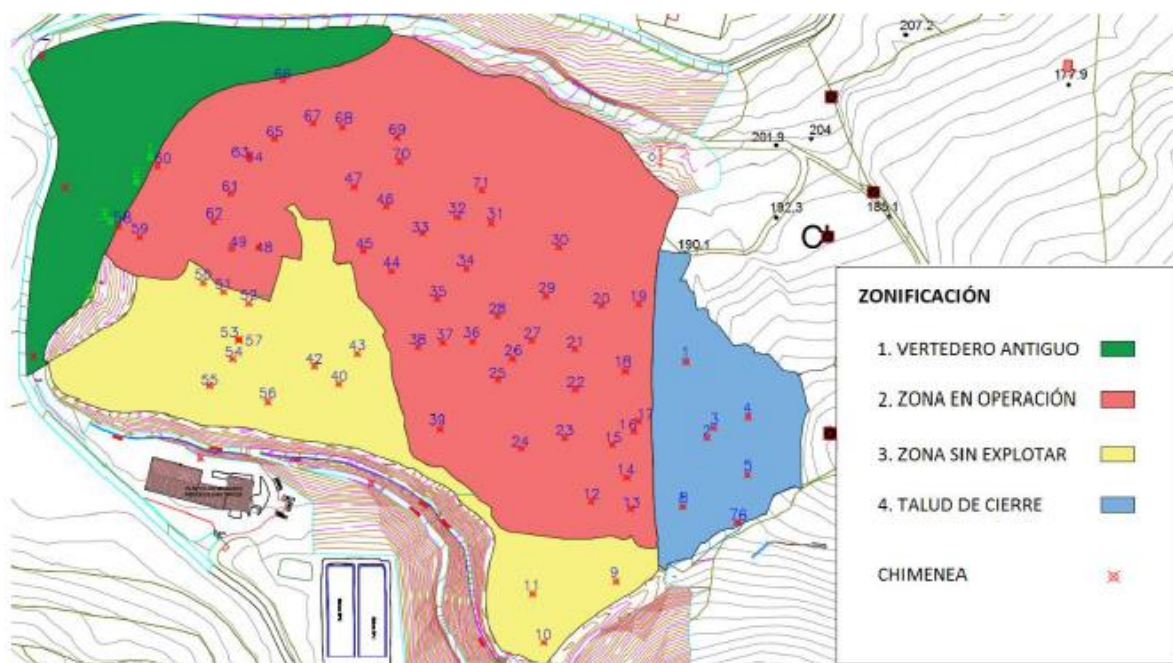
En sus inicios, el vertedero comenzó recibiendo los residuos de una población aproximada de 316.000 habitantes, abarcando un 61% del total de la zona. Un año más tarde, con la introducción de varias modificaciones en el territorio, se agregaron los residuos de aproximadamente 135.500 habitantes, logrando recibir los desechos de un 87,5% de la región. Posteriormente, en junio de 2002, se destina a gestionar todos los residuos sólidos urbanos regionales, es decir, aproximadamente 230.000 toneladas de residuos (Gómez Noriega, 2016).

Desde su creación, se pueden distinguir tres fases de operación. La primera, hasta el año 1990, donde los residuos fueron depositados en una pequeña zona de vertido, ubicada en la parte norte de las instalaciones, la cual quedó clausurada de inmediato con la apertura del vaso actual (Vaso 1). En este vaso, se fueron depositando residuos en capas sucesivas, con una impermeabilización de capas de arcilla compactada, provocando el crecimiento en altura del depósito sobre el terreno natural. Además, para su acondicionamiento, según lo especificado en el RD 1481/2001, en el año 2010 se realizaron obras de impermeabilización, donde se incluyó el sellado de los residuos depositados y la impermeabilización de un nuevo vaso de vertido, expansión vertical del existente, es decir, el nuevo vaso se encuentra sobre el anterior, y cuenta con un sistema de doble capa de arcilla y geomembrana cubierto con gravas. Con esto, se dio lugar al Vaso 2 de operación, el que se encuentra activo desde octubre del año 2011 y que está aislado de la fase anterior tanto a efectos hidráulicos como de migración difusa de gas (GIA, 2019).

Con el fin de facilitar la orientación y la organización del trabajo de campo, se puede dividir el vertedero en cuatro zonas, Vertedero antiguo, Zona en operación, Zona sin explotar y Talud de cierre. Entre las cuatro se alcanza una superficie total de 209.485 m<sup>2</sup>, pudiendo recibir aproximadamente 6 millones de toneladas de residuos (MARE, 2013). Las zonas son netamente

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

dividas de esta manera (Figura 1) a modo de facilitar el trabajo, ya que sus áreas van cambiando a medida que avanza el frente de vertido.



**Figura 1. Zonificación del vertedero a modo orientativo (fuente: GIA, 2019a)**

### Vertedero antiguo

Corresponde a la primera zona explotada, específicamente desde 1989 hasta 1991, con una superficie de 28.659 m<sup>2</sup>. La zona fue sellada con una capa final compuesta por materiales arcillosos. Tiempo después parte de la zona se acondicionó para instalar dependencias de la empresa explotadora y el resto se cubrió con vegetación, a excepción de aquellas zonas destinadas al tránsito de camiones.

### Zona en operación

Actualmente corresponde al Vaso 2, ya que el Vaso 1, que se encuentra bajo de este, ya fue explotado. Este vaso ha estado recibiendo residuos desde octubre del 2011 hasta la fecha y posee un área total de 113.796 m<sup>2</sup>.

Aquí, los residuos se depositan en capas de 4 metros de espesor, cubriéndolas con materiales margo-arcillosos que se extraen del mismo vaso, principalmente rechazo de cantera y escorias Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

de incineración, dependiendo de la fase de explotación. Esta cobertura es temporal, por lo que es la mayor fuente de emisiones superficiales.

### **Zona sin explotar**

Es una parte del Vaso 2, de 45.168 m<sup>2</sup>, que se sitúa sobre el área sellada con cobertura definitiva correspondiente al Vaso 1, es decir, existe una capa de gravas de drenaje de fondo colocada esperando a que la zona sea explotada.

### **Talud de cierre**

Finalmente, se encuentra el talud de cierre, el cual corresponde a un área de 21.861 m<sup>2</sup>, que hace de contención y se construye a medida que el vertedero crece en altura (GIA, 2019).

A medida que cambió la configuración del vertedero, también varió el sistema de evacuación, tratamiento y aprovechamiento de biogás. En un principio este tenía un gran dren central de escollera, el que facilitaba la evacuación pasiva del gas. Luego, al abarcar una mayor superficie y altura, durante la fase 2 el sistema fue cambiado a un conjunto de pozos de captación interconectados entre sí, los cuales son recrecidos al aumentar la altura de residuos. En 1998, se implementó el sistema de aprovechamiento de gas, con una capacidad que ha ido en aumento con el pasar de los años. Actualmente, cuenta con seis motores de 477 kWe para generación de energía eléctrica (una parte de esta se emplea en el propio funcionamiento de la planta y el resto es exportada a la red eléctrica) (MARE, 2013), y una antorcha de 700 Nm<sup>3</sup>/h de capacidad nominal, donde se quema el excedente de gas. El biogás captado por los 71 pozos disponibles es conducido hasta los motores a través de 12 líneas de colectores, impulsado por tres soplantes de funcionamiento excluyente de hasta 1500 Nm<sup>3</sup>/h de capacidad. Además, en el Vaso 2 se han instalado nuevos pozos de desgasificación, los que van conectados a la red de extracción activa de gas (GIA, 2019)

## **2.1. Residuos aceptados**

Según lo señalado en el Real Decreto 1481/2001 (Ministerio del medio ambiente, 2002), el vertedero en estudio se encuentra clasificado dentro de la categoría 'Vertedero de residuos no peligrosos', en los cuales se permite el depósito de residuos de procedencia urbana e industrial del

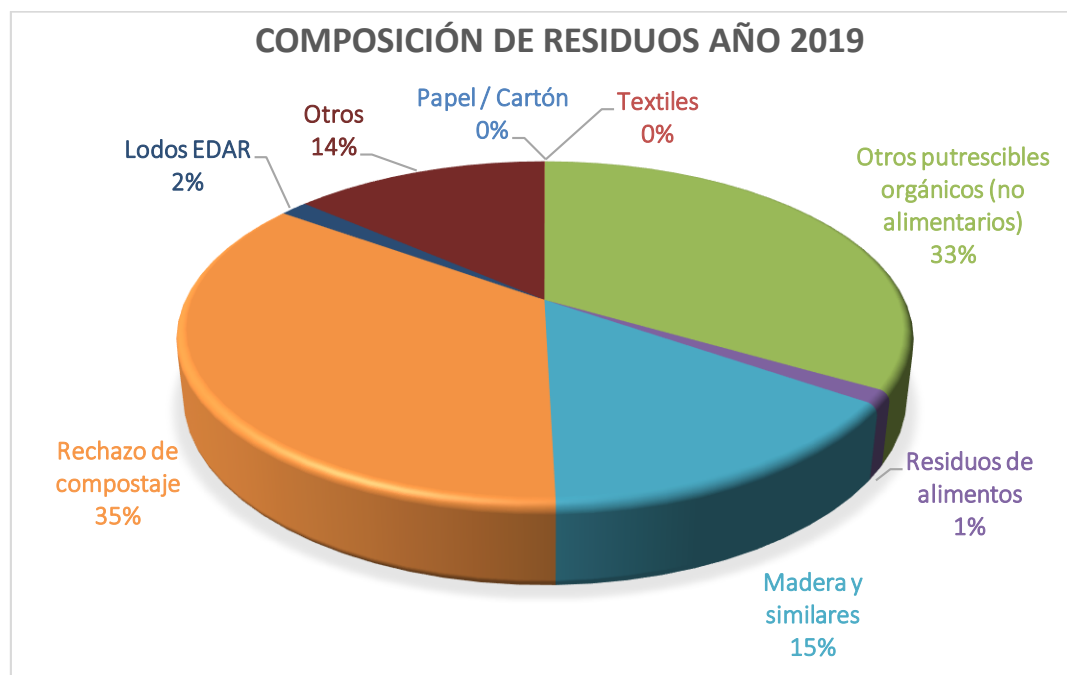
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG "Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero"

tipo no peligroso según lo especificado en el artículo 3, párrafo c, de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos.

La región posee un sistema de recogida selectiva de papel y cartón, envases ligeros y envases de vidrio, pero al clasificarse como vertedero de residuos no peligrosos, el principal aporte proviene de residuos urbanos o asimilable a urbanos, es decir, residuos orgánicos, aunque previamente tratados.

El vertedero, también recibe los residuos no peligrosos provenientes de las plantas de transferencia y puntos limpios, además del rechazo de la Planta de Tratamiento Mecánico Biológico (TMB) de la zona, donde se tratan los residuos para obtener materiales reciclables recuperados, como lo son combustible derivado de desechos y material bioestabilizado. Desde la TMB, se envían al vertedero los rechazos producidos luego de la bioestabilización, además de la escoria de la planta de recuperación energética y otros desechos.

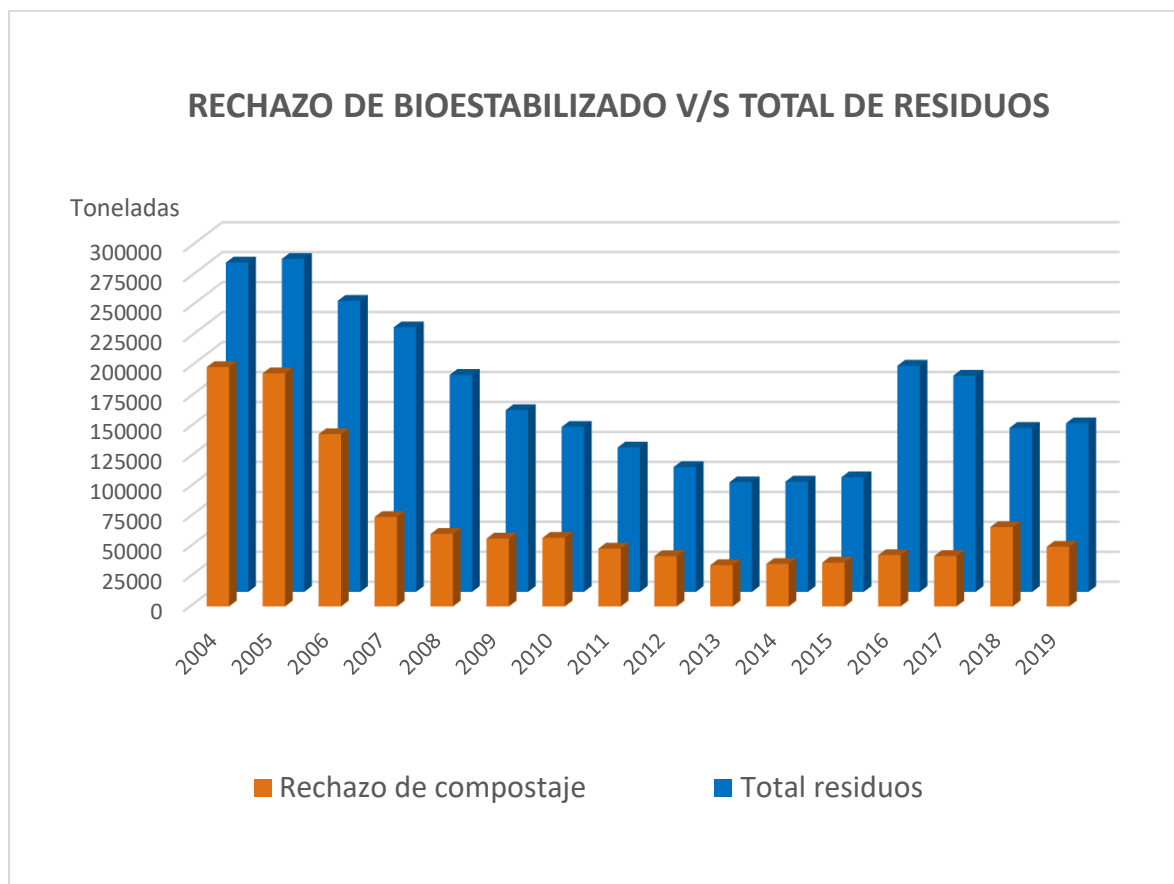
A continuación, en la figura 2, se presenta una gráfica donde es posible visibilizar los diversos tipos de residuos depositados en el vertedero durante el año 2019.



**Figura 2. Composición de residuos año 2019.**

Como se puede apreciar, la cantidad de rechazo de compostaje (rechazos de bioestabilización) es Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

considerablemente alta durante el año 2019, siendo un 35% de un total de aproximadamente 140.000 toneladas de residuos depositados. A continuación, se presenta una gráfica donde es posible apreciar la magnitud que tiene el rechazo de bioestabilización en el vertedero desde el año 2004 en adelante.



**Figura 3. Fracción rechazo de bioestabilización v/s total de residuos.**

## 2.2. Clima

El vertedero se encuentra ubicado en una zona caracterizada por tener un clima submediterráneo, intermedio entre mediterráneo y atlántico. La precipitación media anual ronda los 1500 mm (Ancell Trueba & Célis Díaz, 2013), siendo los meses entre septiembre y febrero los de mayores precipitaciones, por el contrario, julio y agosto se consideran meses secos.

Con respecto a las temperaturas, estas rondan los 13,5 °C, donde entre enero y febrero se alcanzan

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

las mínimas (Weather Spark, 2020).

La evapotranspiración potencial (ETP) media anual, basada en los datos entregados por el Instituto Geográfico Nacional y el Ministerio de Fomento, varían entre los 700 y 800 mm (calculado mediante la fórmula de Penman-Monteith) (Instituto Geográfico Nacional, 2014).

### **3. METODOLOGÍA DE CAMPAÑA DE MEDICIÓN**

En este apartado se describe brevemente el protocolo de medida que se utiliza para realizar el trabajo *in situ*, especificando el procedimiento a seguir y los equipos necesarios, además, se detalla el trabajo de gabinete realizado para el procesamiento de datos y posterior elaboración de informes.

Las campañas de mediciones en el vertedero tienen como objetivo principal lograr cuantificar las emisiones difusas producidas y están basadas en las normativas *Surface VOC Emissions Monitoring on Landfill Facilities (AG6)* (Environmental Protection Agency, 2011) y *Guidance on monitoring landfill gas Surface emissions (LFGTN07)* (Environment Agency (EA) & Scottish Environment Protection Agency (SEPA), 2010) de la Agencia de Medio Ambiente del Reino Unido, ambas reconocidas mundialmente como referencias para la caracterización de emisiones en vertederos.

Gracias a los antecedentes recopilados durante las diferentes campañas de medida que se han realizado en el vertedero por parte del grupo investigador, además, se ha diseñado un protocolo específico para la evaluación de las emisiones difusas.

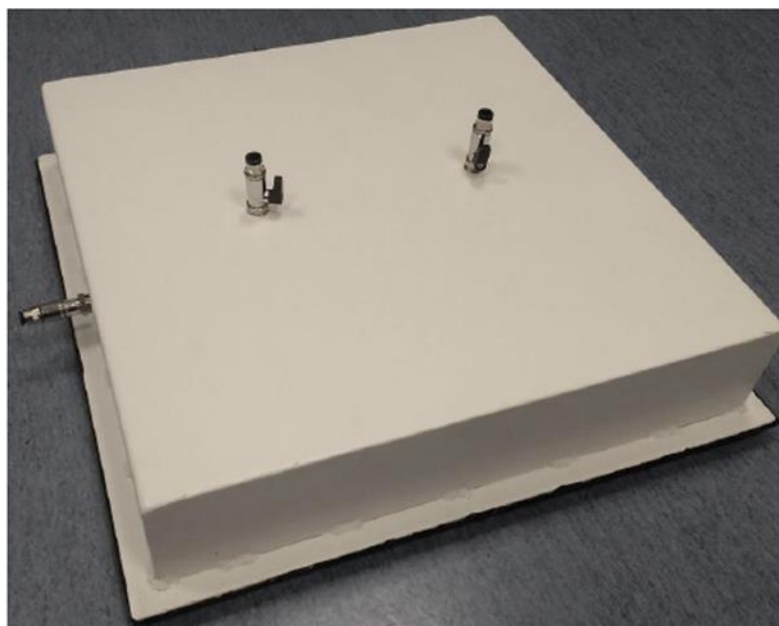
#### **3.1. Equipos de medida.**

Para el trabajo de campo se necesita de dos instrumentos, en primer lugar, está el LaserOne, éste es un equipo digital de detección de gas de la marca HUBERG que, mediante tecnología láser, permite la detección de CH<sub>4</sub> en bajas concentraciones. Cuenta con un rango de medida de entre 0 a 10.000 ppm, además de un sistema GPS y registro de medidas, logrando así, la localización de estas en el vertedero.



**Figura 4. Equipo LaserOne marca HUBERG (fuente:Direct Industry, n.d.)**

Por otro lado, el segundo equipo necesario para la realización de las campañas, corresponde a la cámara de flujo estática, esta fue desarrollada por el Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) de la Universidad de Cantabria y tiene una superficie de 50 cm x 50 cm, con una altura útil de 10 cm. Es una cámara hecha de aluminio, lo cual facilita su manejo en terreno, además, es de color blanco, lo que permite reflejar los rayos del sol, evitando que exista un excesivo incremento de temperatura dentro de la cámara, lo cual puede influir en las mediciones. A 2 cm del borde inferior de la cámara se instaló una pletina de 2 cm de longitud que recorre todo el perímetro, acotando de manera más precisa el volumen útil de la cámara en que se realiza la medición. Entre la platina y la cámara, se encuentra una lámina de neopreno que ayuda a asegurar la estanqueidad cuando se encuentra instalada en terreno.



**Figura 5. Cámara de flujo estática (fuente: GIA, 2019b)**

Como se puede apreciar en la Figura 5, la cámara cuenta con tres conexiones hacia el exterior mediante válvulas soldadas que permiten la unión estanca de los distintos equipos de medida o la instalación de conducciones auxiliares para equilibrio de presiones en caso de ser necesario, ambos instrumentos se acoplan mediante un tubo plástico que forma parte del LaserOne.

### **3.2. Procedimiento de medición**

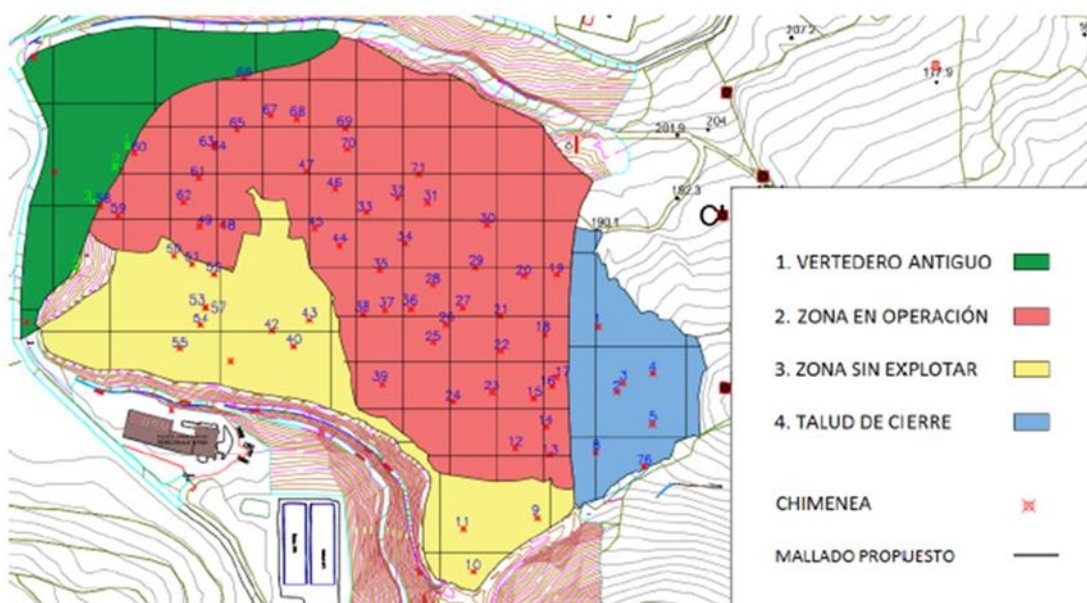
La norma *Guidance on monitoring landfill gas Surface emissions (LFTGN07)* (Environment Agency (EA) & Scottish Environment Protection Agency (SEPA), 2010), es la que establece el número de puntos en los que se debe realizar la medida de la tasa de emisión, recomendando un mínimo de seis mediciones y un número adicional de puntos de medición igual a 0.15 veces la raíz cuadrada del área (en  $m^2$ ). Esto supone 16 puntos de medición para un área de 5000  $m^2$ , 53 puntos para 100.000  $m^2$  y 156 puntos en 1 millón de  $m^2$ .

Debido a lo anterior, previo a efectuar la campaña en terreno, se procede a realizar un trabajo de gabinete clave que permite caracterizar cada zona del vertedero de manera consistente. Esto se basa en tomar el mapa del vertedero y generar un mallado sobre él (como se muestra en la Figura 6), dando diferente prioridad a cada zona en cuanto a cantidad de mediciones a realizar, siendo la

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”



zona en operación la más importante, es decir, en la que se deben realizar mayor cantidad de mediciones. Durante la campaña se deberá realizar al menos una medición dentro de cada cuadrícula de la malla generada y cada campaña será diferente, debido a que el frente de vertido irá avanzando, provocando así, nuevas zonas para medir y otras donde no se podrá trabajar por razones de seguridad.



**Figura 6. Zonificación del vertedero según potencial de emisión superficial y mallado propuesto para distribución de puntos de medida (fuente: GIA, 2019b)**

El procedimiento de medición realizado en terreno, es simple de ejecutar. En primer lugar, se deben transportar los equipos a un punto seleccionado del vertedero, luego se debe colocar la cámara estática de flujo sobre el terreno, cuidando que los bordes de la cámara queden completamente sellados, evitando superficies irregulares y así manteniendo el gas dentro de la cámara. Una vez instalada la cámara de flujo en terreno, se conecta el tubo plástico, se abre la válvula y se inicia la medición, la cual debe durar aproximadamente 5 minutos, una vez pasado el tiempo de medición simplemente se detiene el LaserOne y se quitan los equipos.

Es importante llevar un registro fotográfico de los puntos donde se realiza la medición (Figuras 7 y 8), además de escribir una breve descripción de la zona donde se realiza cada medición, destacando sus particularidades y facilitando el posterior análisis y trabajo de gabinete.



**Figura 7. Punto de medición con cámara de flujo.**



**Figura 8. Punto de medición sin cámara de flujo.**

### **3.3. Trabajo de gabinete**

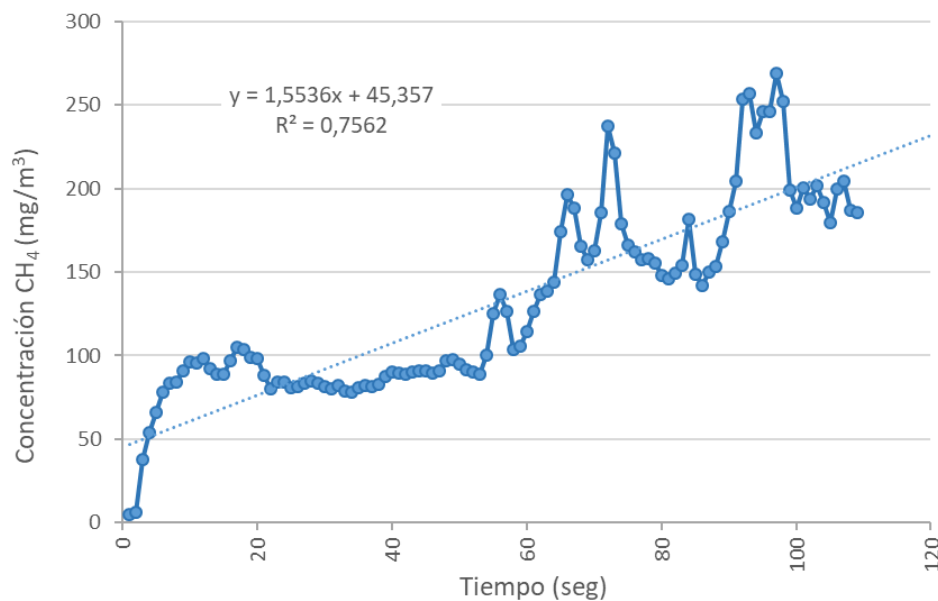
Esta parte del trabajo se divide en 2 procesos. En primer lugar, se deben convertir los datos medidos por el LaserOne, los cuales son medidos en partes por millón (ppm), y para ser implementados deben estar en concentración de metano en  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Esta transformación se realiza utilizando el volumen molar normal y el peso molecular del metano (22,4 litros y 16 gr/mol respectivamente). Una vez obtenida la concentración de metano para cada segundo de medición, se genera una curva de la cual se necesita la pendiente para, en conjunto con la altura de la cámara de flujo estática (0,12 m), conocer el flujo de gas en  $\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$ .

Una vez calculado el flujo de gas de todos los puntos medidos en terreno, se debe realizar una revisión y análisis de los resultados ya que existen tres situaciones diferentes.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

- La emisión medida en el punto puede estar dentro de los rangos considerados como aptos por la normativa de referencia, lo cual dependerá de la zona en la que se realizó la medición, ya que los límites son diferentes según el tipo de cobertura. Para coberturas provisionales, los límites de emisión establecidos son de  $0,1 \text{ mg/m}^2/\text{s}$  de flujo de metano y para zonas con cobertura definitiva el flujo no puede exceder los  $0,001 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ .
- En caso de que la pendiente de la curva no logre tener una tendencia mayor a 0,7 o bien sea negativa, se considera que la emisión en el punto es demasiado baja, adoptándose un valor mínimo de flujo en aquella zona igual a  $0,00005 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ .
- Si el punto cumple con la pendiente de la curva óptima, pero supera los límites establecidos para la zona en cuestión, este será considerado como un *HotSpot* (o punto caliente).

Las figuras que se presentan a continuación (figuras 9, 10 y 11) ejemplifican los resultados obtenidos de un punto analizado en la quinta campaña correspondiente a un *HotSpot*.



**Figura 9. Grafica de punto HotSpot de la quinta campaña.**

VOLUMEN molar normal	22,4	litros
PESO MOLECULAR CH <sub>4</sub>	16	gr/mol
Volumen de la cámara	0,03	m <sup>3</sup>
Área de la cámara	0,25	m <sup>2</sup>
Altura de la cámara	0,12	m
Pendiente de la cuva	1,55359029	mg/m <sup>3</sup> ·s
Flujo de gas	0,18643084	mg/m <sup>2</sup> ·s

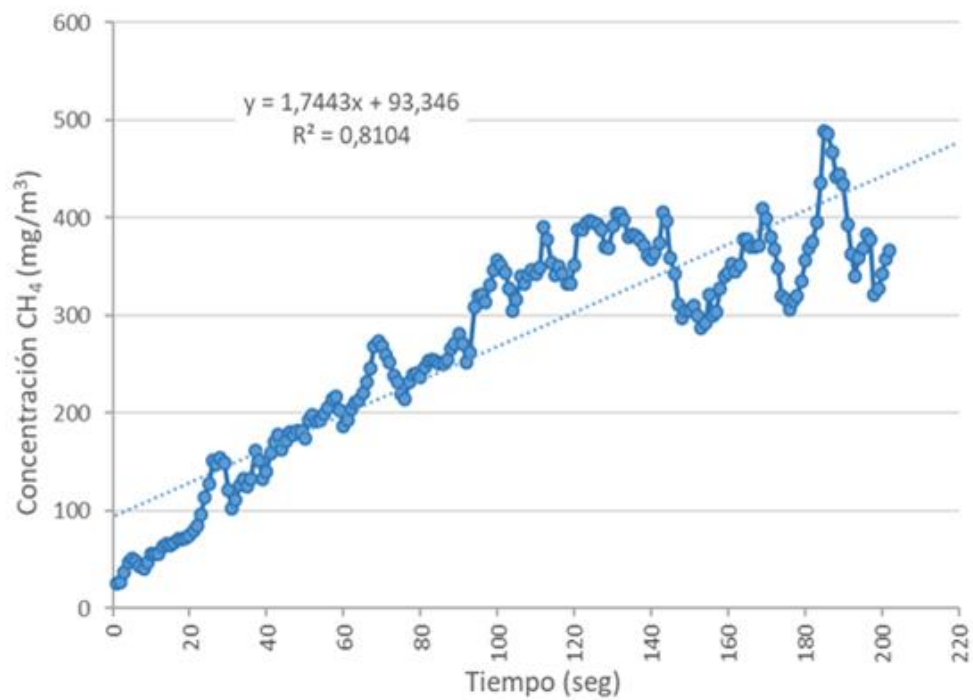
**Figura 10. Flujo de gas obtenido de punto HotSpot de la quinta campaña.**

<b>Notas campo</b>
Zona situada entre chimeneas 49 y 48. Sellado con gomas.

**Figura 11. Nota de campo punto HotSpot de la quinta campaña.**

Por otro lado, de cada campaña realizada se debe elaborar un informe, en el cual se plasma una descripción general, las condiciones climáticas de los días en los que se realizó la campaña, los resultados de las mediciones en los diferentes puntos, una breve descripción de lo que se logró observar con respecto a las chimeneas del vertedero y finalmente se entregan conclusiones y recomendaciones.

En el apartado de resultados de la campaña, se debe realizar una breve descripción de cada uno de los puntos donde la concentración supera los límites de referencia detectados, incluyendo fotos del lugar donde se realizó la medición y también la gráfica obtenida, tal como se presenta a continuación en las Figuras 12 y 13.



**Figura 12. Grafica incluida en el informe de la campaña 5.**



**Figura 13. Imagen de punto incluida en informe campaña 5.**

#### **4. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE BIOGÁS**

Para lograr estimar la cantidad de emisiones difusas de metano que se producen en el vertedero, fue necesaria la creación de un modelo matemático con base en las ecuaciones propuestas por el modelo de descomposición de primer orden del Panel Intergubernamental de Cambio Climático o IPCC como es conocido por sus siglas en inglés (IPCC, 2006). La diferencia radica en que, en el caso del modelo elaborado por el Grupo de Ingeniería Ambiental (Modelo GIA), se utilizaron parámetros actualizados con base en diversas fuentes bibliográficas donde, además, se incluyen parámetros nuevos que no habían sido considerados por el IPCC.

Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, para utilizar las ecuaciones del modelo matemático creado, se ha fabricado una herramienta de calculo que permite unificar las ecuaciones del modelo, los diferentes parámetros de entrada, las condiciones climáticas de la zona

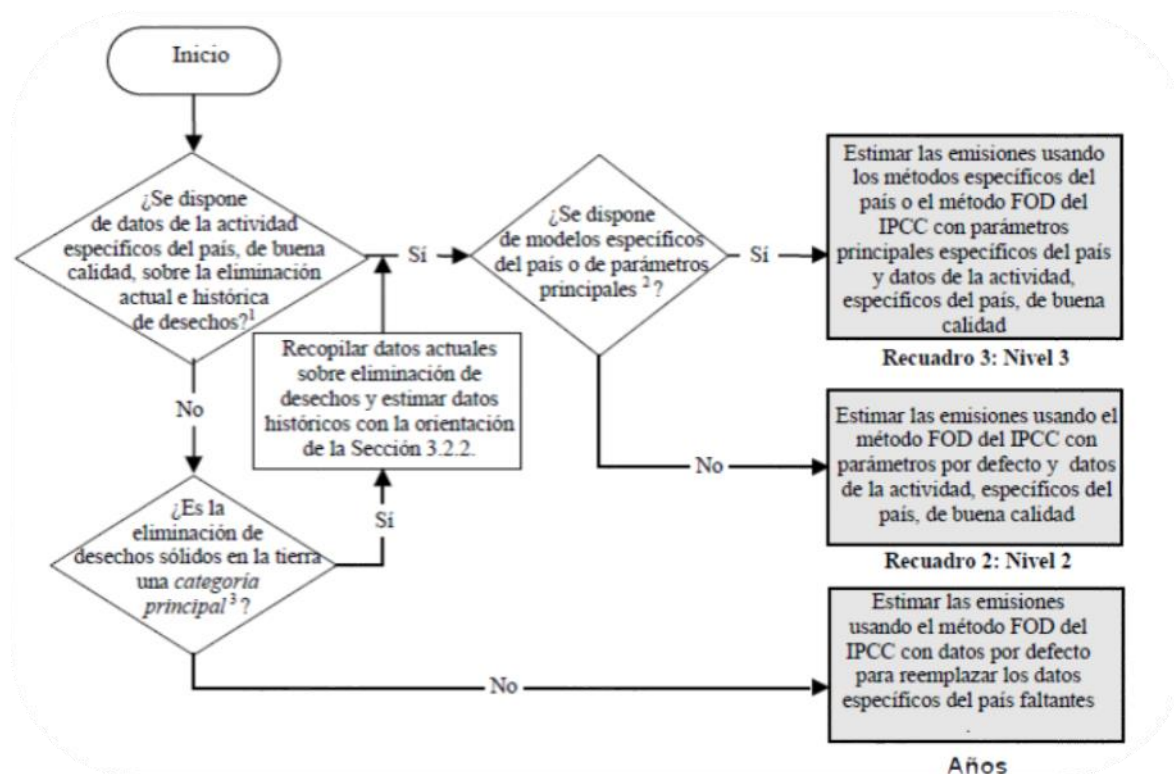
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”



y las decisiones tomadas con respecto a la gestión del vertedero en un solo elemento que facilita y agiliza la estimación de emisiones difusas de biogás en el vertedero en estudio. Con la creación de esta herramienta se busca reflejar lo que sucede en el vertedero de la forma más fidedigna posible.

#### 4.1. Modelo IPCC

Este modelo fue propuesto por un panel de expertos pertenecientes al IPCC, con el fin de orientar a las autoridades sobre la cuantificación de emisiones de metano de los vertederos de un país (Oonk, 2010). Y como se trata de un modelo internacional, no especifica las condiciones para un lugar en concreto. A continuación, se presenta un árbol de decisión para las emisiones de metano provenientes de los sitios de eliminación de los desechos sólidos entregado por el IPCC (Pipatti et al., 2006), mediante este árbol de decisión es posible orientarse y lograr estimar las emisiones provenientes de un vertedero a pesar de que no existan datos de calidad tanto de su gestión como de los residuos que en él son depositados.



**Figura 14. Árbol de decisión para emisiones de vertedero (fuente: Pipatti et al., 2006)**

En el nivel 1 del modelo IPCC 2006, se tiene la obligación de clasificar los residuos vertidos en el sitio, pero los parámetros del modelo no dependen del tipo de residuo, dependen más bien, de la cantidad total vertida. Por lo tanto, la única entrada del modelo es la cantidad de residuos anuales clasificados y el modelo por defecto asigna a todas las zonas de un país las mismas condiciones climáticas. Este es el nivel que actualmente utilizan la mayoría de los vertederos españoles.

El modelo de descomposición de primer orden propuesto por el IPCC, hace una diferencia entre los distintos tipos de residuos y sus respectivas fracciones de carbono orgánico degradable (DOC) y tasas de descomposición (k). Además, calcula la generación de CH<sub>4</sub> ocurrida en el año en basado en corrientes de cada tipo de residuo (W) vertido durante un periodo de tiempo específico (años o meses) (Cdm et al., 2011). Parte del metano generado se oxida en la cubierta del vertedero, la cual se puede recuperar para utilizarse como energía o bien, ser quemada en antorchas. Es por esto, que la fracción de metano que realmente se emite desde un vertedero es inferior a la cantidad generada (IPCC, 2006). A continuación, se presenta la ecuación 1 que resume el párrafo anterior, aquí el metano recuperado se debe restar de la cantidad generada, esta fracción que no se recupera es la que está sometida a oxidación en la cubierta del vertedero.

$$CH_4 \text{ emitido}_T = \left( \sum_x CH_4 \text{ generado}_{x,T} - R_T \right) * (1 - OX_T) \quad (1)$$

*Donde:*

*Emisiones de CH<sub>4</sub> = metano emitido durante el año T (en toneladas)*

*T = año del inventario*

*x = categoría o tipo de desecho y/o material*

*R<sub>T</sub> = CH<sub>4</sub> recuperado durante el año T (en toneladas)*

*OX<sub>T</sub> = factor de oxidación durante el año T (fracción)*

A continuación, se presentan las ecuaciones necesarias por poder estimar el potencial de generación de metano en el vertedero.

Para conocer el DDOCm correspondiente a la cantidad depositada de cada tipo de residuo (W) en

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG "Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero"



un año (T), se realiza el producto de la fracción de carbono orgánico degradable en el desecho (DOC), la fracción de carbono orgánico degradable que se descompone en condiciones anaeróbicas (DOCf) y la parte del desecho que se descompone en condiciones aeróbicas, todo previo a que las condiciones se vuelvan anaerobias, lo cual se representa gracias al factor de corrección de metano.

$$DDOC_{mdT} = W_T * DOC * DOFf * MCF \quad (2)$$

Donde:

$DDOCm$  = Cantidad de carbono orgánico degradable que se puede descomponer de un residuo (en toneladas)

$DDOCmd_T$  =  $DDOCm$  depositado en los SEDS durante el año T (en toneladas)

$W$  = masa de los desechos depositados (en toneladas)

$DOC$  = carbono orgánico degradable, fracción, Toneladas de C/Toneladas de desechos

$DOCf$  = fracción del  $DDOC$  que puede descomponerse, fracción

$MCF$  = factor de corrección de metano para la descomposición aeróbica durante el año de deposición, fracción

Conocida la cantidad de material que se encuentra en descomposición en el vertedero al comienzo del año, para el método de estimación, cada año puede considerarse como el año 1 y los cálculos de primer orden pueden ser realizados mediante las siguientes ecuaciones, donde la reacción de descomposición comienza el 1 de enero de cada año posterior al vertido.

$$DDOCm_T = DDOCmd_T + DDOCma_{T-1} * e^{-k} \quad (3)$$

$$DDOCm_{descomp_T} = DDOCma_{T-1} * (1 - e^{-k}) \quad (4)$$

Donde:

$T$  = año de inventario

$DDOCma_T$  =  $DDOCm$  acumulado en los SEDS al final del año T (en toneladas)

$DDOCma_{T-1}$  =  $DDOCm$  acumulado en los SEDS al final del año (T-1) (en toneladas)

$DDOCm_{descomp_T}$  =  $DDOCm$  descompuesto en los SEDS durante el año T (en toneladas)

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG "Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero"

$k$  = constante de reacción

Para determinar la generación de metano proveniente de la cantidad de carbono orgánico degradable que se puede descomponer (DDOCm), se multiplica la fracción de metano contenida en el gas de vertedero por el cociente entre los pesos moleculares del metano y carbono, como se muestra a continuación.

$$CH_4 \text{ generado}_T = DDOCm \text{ descomp}_T * F * \frac{16}{12} \quad (5)$$

Donde:

$CH_4 \text{ generado}_T$  = cantidad de metano generado a partir del material en descomposición

$DDOCm \text{ descomp}_T$  = metano descompuesto durante el año  $T$  (en toneladas)

$F$  = fracción volumétrica de metano en el gas de vertedero generado (fracción)

$16/12$  = cociente de pesos moleculares  $CH_4/C$  (cociente)

Conocida la cantidad de metano que se genera durante un determinado año por cada tipo de residuo, es posible calcular la emisión difusa de metano que va a la atmosfera para un año utilizando la ecuación 1.

A continuación, se describen los parámetros por defectos que el IPCC utiliza en el modelo para la estimación de emisiones difusas, incluyendo sus diferentes condiciones y valores. Entre los parámetros se destacan DOC y DOCf, que dependen de la clase de residuo vertido, además de MCF y F que dependen del tipo de gestión que se realiza en el vertedero estudiado.

En cuanto a los componentes, el IPCC utiliza 11 tipos de desechos sólidos municipales para realizar la modelización de la descomposición de los residuos en vertedero, estos son, Papel/cartón, Textiles, Desechos de alimentos, Madera, Desechos de jardines y parques, Pañales, Caucho u cuero, Plásticos, Metal, Vidrio y Otros, Desechos inertes.

Además, el IPCC incluye en su análisis los lodos de aguas residuales, los desechos industriales y el apartado otros desechos, donde se incluyen los residuos peligrosos y hospitalarios.

### **Carbono orgánico degradable (DOC)**

Corresponde al carbono orgánico degradable durante el año de vertido, el cual puede ser objeto de descomposición bioquímica. Este se expresa como toneladas de carbono por toneladas de desechos.

En la siguiente tabla se muestran los valores de DOC propuestos en el capítulo 2 del IPCC 2006, para los diferentes tipos de residuos que considera en el análisis.

**Tabla 1. Valor de parámetro DOC propuestos por el IPCC (fuente: IPCC, 2006)**

Residuo	DOC en % de desechos húmedos
Papel/cartón	0,40
Textiles	0,24
Desechos de alimentos	0,15
Madera	0,43
Desechos de jardines y parques	0,20
Pañales	0,24
Caucho y cuero	0,39
Plásticos	-
Metal	-
Vidrio	-
Otro, desechos inertes	-
Lodos EDAR	0,05

Como se puede apreciar, solo se muestran los datos de desechos húmedos, ya que estos corresponden a la situación en la que se encuentran los desechos del vertedero en estudio. El único tipo de residuo que no se encuentra considerado por el IPCC y que debe ser incluido en los estudios del vertedero, es el rechazo de bioestabilizado, el que será descrito posteriormente.

#### **Fracción de DOC que se descompone en el vertedero (DOC<sub>f</sub>)**

Este corresponde a una estimación de la fracción de carbono que se degrada en última instancia dentro del vertedero. Esto porque los residuos no podrán degradarse en su totalidad o bien, lo harán lentamente con el transcurso del tiempo, debido a que para que ocurra la degradación, los microorganismos encargados de degradar los residuos deben tener acceso a ellos, situación que generalmente no ocurre de manera rápida. Así es como a modo de resumen, el DOC<sub>f</sub> se puede definir como la fracción de DOC que se transforma en gas de vertedero.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

### Índice de generación de metano (k)

Este parámetro representa la tasa de biodegradación de primer orden a la cual el metano se genera luego de la disposición del residuo en el vertedero y está directamente relacionado con el periodo de vida media ( $t_{1/2}$ ) de los residuos de acuerdo a la siguiente expresión.

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (6)$$

*Donde:*

*K= Valor constante del índice de generación de metano (1/año)*

*T= Año de inventario*

Si el valor de k incrementa, la generación de metano en un vertedero también lo hará, siempre y cuando el vertedero siga recibiendo residuos. Una vez el vertedero es clausurado, la generación de metano va disminuyendo en el tiempo (Aguilar-Virgen et al., 2011).

Hay múltiples factores de los cuales depende la constante k, como lo son la humedad, disponibilidad de nutrientes, pH y temperatura. De los cuales, uno de los que tiene mayor incidencia en la tasa de generación de gas es la humedad, esto se debe a que el líquido que entra en el vertedero es el medio de transporte para los nutrientes y bacterias.

El contenido de humedad dentro del vertedero va a depender de la infiltración de lluvia a través de la cobertura, del contenido inicial de humedad de cada residuo, de la cantidad y tipo de cobertura diaria que se aplica en el lugar, de la permeabilidad y del tiempo de disposición de la cobertura final, del tipo de impermeabilización de la base, el sistema de recolección de lixiviados y de la profundidad del residuo (Aguilar-Virgen et al., 2011).

Los índices más rápidos, por ejemplo, valores de  $k=0,2$  o vida media cercana a los 3 años, se asocian a condiciones de gran humedad y a materiales altamente degradables, como los desechos alimenticios. En caso contrario, cuando el valor del índice k es igual a 0,02 o una vida media cercana a 35 años, es posible asociarlo a vertederos en condiciones de sequedad y con residuos lentamente degradables, como lo son la madera o el papel (Pipatti et al., 2006)

Es debido a lo anterior, es que el IPCC entrega valores de k dependiendo de las zonas climáticas donde se encuentra el vertedero, dividiéndolas respecto de tres variables, temperatura media

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

TFG "Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero"

anual (TMA), precipitación media anual (PMA) y evapotranspiración potencial (ETP), como es posible observar en la Tabla 2.

**Tabla 2. Valor de índice de generación de metano (k) por defecto en el IPPC (2006)**  
(fuente: Pipatti et al., 2006)

Tipo de desecho	Zona climática			
	Templada (MAT $\leq 20^{\circ}\text{C}$ )		Tropical (MAT $> 20^{\circ}\text{C}$ )	
	Seco (MAP/PET $< 1$ )	Húmedo (MAP/PET $> 1$ )	Seco (MAP $< 1000\text{mm}$ )	Húmedo y seco (MAP $\geq 1000\text{ mm}$ )
Papel	0,04	0,06	0,045	0,07
Textiles	0,04	0,06	0,045	0,07
Madera	0,02	0,03	0,025	0,035
Otros orgánicos (no alimenticios)	0,05	0,10	0,065	0,17
Parque y jardín	0,05	0,1	0,065	0,17
Alimenticios	0,06	0,185	0,085	0,4
Lodos residuales	0,06	0,185	0,085	0,4
Desechos brutos	0,05	0,09	0,065	0,017

### Factor de corrección del metano (MCF)

Del inglés *Methane Correction Factor*, el parámetro MCF da cuenta de la diferencia que existen entre los distintos sitios de eliminación de desechos sólidos (SEDS), los cuales se encuentran clasificados en cinco categorías presentadas en la Tabla 3. donde se puede apreciar que las prácticas de eliminación de desechos varían respecto del control, la disposición de los desechos y la gestión del sitio (Pipatti et al., 2006).

**Tabla 3. Valores del parámetro MCF en función del tipo de vertedero en IPPC (2006)**  
(fuente: Pipatti et al., 2006)

Tipo de sitio	Valores de MCF
Gestionado anaerobio	1

Gestionado semi-anaerobio	0,5
No gestionado (>5m de profundidad)	0,8
No gestionado (<5m de profundidad)	0,4
SEDS no categorizado	0,6

---

El IPCC explica que, a partir de una cantidad dada de desechos, los sitios no gestionados producen menos metano que los sitios anaeróbicos gestionados, teniendo en cuenta que la generación de CH<sub>4</sub> ocurre únicamente en aquellos sectores del vertedero donde se presenten condiciones estrictamente anaeróbicas.

Es por esto que se asigna un MCF a cada una de las cuatro categorías de SEDS, más una extra por defecto, para aquellos donde no se conoce la cantidad de desechos depositados.

#### **Fracción de metano en el biogás generado (F)**

Considerando que el gas de vertedero está compuesto principalmente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, generalmente en un SEDS, la mayor parte de los desechos generan un gas con aproximadamente 50% de metano, superándose ese rango solo en aquellos desechos con considerables cantidades de grasas o aceites. Es por esto que, por defecto, el IPCC propone un valor de F igual a 0,5 (Pipatti et al., 2006).

Es importante no confundir la fracción de metano en el gas de vertedero generado con el CH<sub>4</sub> medido en el gas emitido desde el vertedero, debido a que muchos vertederos con sistema de captación de biogás, tienen la capacidad de analizar el contenido de metano del gas captado y, por consiguiente, introducen en el modelo ese valor obtenido, el cual es superior al 0,5 propuesto por el IPCC.

#### **Factor de oxidación (OX)**

Este parámetro refleja la cantidad de metano en el vertedero que se oxida en el suelo u otro material que cubra los desechos. El metano se oxida por la acción de microorganismos metanotróficos que se encuentran en los suelos de la cobertura y pueden ser variables en cantidad, desde pequeños valores casi insignificantes hasta el 100% del metano producido internamente. El

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

espesor, las propiedades físicas y el contenido de humedad de las coberturas, afectan de forma directa en la oxidación del metano (Bogner & Matthews, 2003).

Este parámetro es el más estudiado y contemplado en la bibliografía. En todas las referencias consultadas, la fracción de CH<sub>4</sub> oxidado en los suelos de la cubierta es mayor que el valor predeterminado del 10% propuesto por el IPCC y la agencia USEPA. A pesar de los hallazgos recientes, el IPCC no se ha desviado de los valores por defecto del 0-10% propuestos en 1995 (Vadillo Abascal, 2018).

### **Tiempo de retardo**

Generalmente, en la mayoría de los SEDS, el depósito de los desechos ocurre de manera continua a lo largo del año. Existen pruebas de que la producción de metano no comienza inmediatamente después de la deposición de los desechos, sino que tarda una cierta cantidad de tiempo en producirse la degradación de estos y a su vez la generación de CH<sub>4</sub>.

El periodo que debe transcurrir entre la deposición de los desechos y una plena producción de metano es químicamente complejo e implica reacciones microbianas sucesivas. El IPCC proporciona un valor por defecto de 1 año para el tiempo de retardo (Pipatti et al., 2006), equivalente a un tiempo de comienzo de la reacción al primero de enero del año posterior a la deposición, cuando el tiempo promedio de estancia de los desechos en el vertedero ha sido de seis meses. Aunque existe una incertidumbre de esta hipótesis de al menos 2 meses.

## **4.2. Modelo GIA**

Con el fin de reducir la incertidumbre en la estimación de las emisiones difusas de metano a la atmósfera provenientes del vertedero en estudio, es que se intenta obtener la información necesaria sobre los diferentes parámetros del modelo y así lograr aplicar un modelo de multifase de primer orden, el cual tiene como consideración principal la utilización de diferentes fracciones de residuos y diferentes tasas de producción. Todo esto aplicado al vertedero en estudio, considerado un vertedero de nivel 3, según lo que se explica en la Figura 13, lo que equivale a entrar en una estimación más detallada y específica de las emisiones de metano.

Es así como en el año 2019 fue elaborado un modelo donde se incluyeron las condiciones

climatológicas (precipitación, evapotranspiración, temperatura y humedad), la forma de gestión del vertedero (anaerobio controlado, semi-aerobio, aerobio y no controlado) y el tipo de residuo depositado, buscando una estimación más acertada para las emisiones de metano en el vertedero en estudio.

En primera instancia el modelo GIA se elabora presentado un enfoque más compacto de los cálculos realizados que el modelo IPCC. En él, se suman los DDOCm depositados dentro del vertedero durante un año a los DDOCm restantes de los años anteriores. La emisión de metano para el siguiente año se calculó a partir del “total en curso” del DDOCm que permanece en el sitio. Al conocerse la cantidad de DDOCm en el vertedero al inicio del año, el método de estimación puede considerarse cada año como si fuera el año 1 ya que, en una reacción de primer orden, la cantidad de producto (DDOCm descompuesto) es siempre proporcional a la cantidad de material reactante (DDOCm) y por lo tanto lo único que cuenta es el total de DDOCm restante en el sitio. Luego, con el modelo se logra calcular el metano generado a partir del DDOCm mediante el cálculo de la cantidad de DOC que se descompone en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> cada año y resta el CH<sub>4</sub> recuperado y el CH<sub>4</sub> oxidado en el material de la cubierta, produciendo como resultado la cantidad de metano emitido.

El modo de calcular el metano emitido, con los datos sobre eliminación de desechos, se realiza mediante las siguientes ecuaciones.

Cálculo del DDOCm depositado (DDOCmd<sub>T</sub>).

$$DDOCmd_T = W_T * DOC * DOCf * MCF \quad (7)$$

DDOCm acumulado (DDOCma) en el vertedero al término del año T.

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + DDOCma_{T-1} * e^{-k} \quad (8)$$

DDOCm descompuesto en el vertedero al término del año T.

$$DDOCm_{descomp_T} = DDOCma_{T-1} * (1 - e^{-k}) \quad (9)$$

Metano generado a partir del DDOCm descompuesto.



$$CH_4 \text{ generado}_T = DDOCm \text{ descomp}_T * F * \frac{16}{12} \quad (10)$$

Posteriormente, el metano que es generado por cada categoría de desecho vertido, se suma para obtener el total de metano que se generan durante el año. Finalmente, las emisiones de metano a la atmosfera se calculan restando el metano recuperado desde el sitio de eliminación y luego, también se resta el metano que se oxida en la superficie de la cubierta del vertedero.

$$CH_4 \text{ emitido}_T = \left( \sum_x CH_4 \text{ generado}_{x,T} - R_T \right) * (1 - OX_T) \quad (11)$$

Donde:

$DDOCm$  = cantidad de carbono orgánico degradable que se puede descomponer de un residuo (en toneladas)

$DDOCmd_T$  =  $DDOCm$  depositado durante el año  $T$  (en toneladas)

$WT$  = masa de los desechos eliminados durante el año  $T$  (en toneladas)

$DOC$  = carbono orgánico degradable durante el año del depósito (fracción)

$DOCf$  = fracción del  $DOC$  que puede descomponerse en condiciones anaeróbicas (fracción)

$MCF$  = factor de corrección del metano para el año de la eliminación (fracción)

$T$  = año  $T$  (año del inventario)

$k$  = tasa de la constante de reacción ( $\text{año}^{-1}$ )

$DDOCma_T$  =  $DDOCm$  acumulado en los SEDS al final del año  $T$  (en toneladas)

$DDOCma_{T-1}$  =  $DDOCm$  acumulado en los SEDS al final del año  $(T-1)$

$DDOCm \text{ descomp}_T$  =  $DDOCm$  descompuesto durante el año  $T$  (en toneladas)

$CH_4 \text{ generado}_T$  = cantidad de  $CH_4$  generado a partir del  $DDOCm$  que se descompone

$F$  = fracción volumétrica de  $CH_4$  en el gas de vertedero generado

$16/12$  = cociente de peso molecular  $CH_4/C$  (cociente)

$CH_4 \text{ emitido}_T$  =  $CH_4$  emitido durante el año  $T$  (en toneladas)

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG "Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero"

$x$  = categoría o tipo de desecho y/o material

$R_T$  =  $CH_4$  recuperado durante el año  $T$  (en toneladas)

$OX_T$  = factor de oxidación durante el año  $T$  (en toneladas)

Como se puede observar, la formulación del modelo GIA, en un principio tenía ecuaciones muy similares a las propuestas por la directiva del IPCC. Sin embargo, en el tiempo transcurrido desde su creación, ha ido recibiendo diversas modificaciones que han ayudado a conseguir mejores resultados en la estimación de metano. A continuación, se presentan las seis modificaciones realizadas, además de la versión inicial del año 2019.

### Versión inicial (2019)

Corresponde a la formulación del modelo que se presentó anteriormente. Para los cálculos de estimación de emisiones, se contó con datos históricos de la composición de todos los residuos depositados en el vertedero en estudio, gracias a esto no fue necesario estimar porcentajes para las diferentes fracciones de residuos. Sin embargo, fue necesario agregar el residuo “rechazo de compostaje”, fracción que es depositada en el vertedero y no era considerada en las recomendaciones de la directiva IPCC, de esta fracción también se conocían sus datos históricos.

En cuanto a los valores de DOC y  $k$ , estos no fueron modificados con respecto a lo propuesto por la directiva, pero si se incluyeron sus respectivos nuevos valores para la fracción “rechazo de compostaje”. El valor dado al parámetro DOC de la fracción rechazo de compostaje es de 0,1, debido a que es una fracción más degradada que los residuos de alimentos, por lo que el contenido de DOC es menor. En cuanto a la tasa de generación de metano, esta es considerada la misma para ambas fracciones, es decir,  $k$  igual a 0,185.

El parámetro MCF, se redujo con respecto a lo que propuso el IPCC, desde 1 a 0,95 con el fin de representar de manera fidedigna lo que sucede en el vertedero. Lo anterior se basa en que el frente de vertido se encuentra en constante avance, dejando áreas de la superficie expuestas al aire. Además, es normal ver grietas sobre la cobertura temporal, esto da paso a la introducción de oxígeno en la masa de residuos.

El resto de los parámetros han mantenido sus valores según lo recomendado por el IPCC, incluyendo el factor de oxidación (OX), el cual según algunas fuentes bibliográficas (Abichou et al.,

2006; Abushammala et al., 2014; Bian et al., 2018) puede variar del propuesto por defecto por el IPCC, pero para esto se deben realizar estudios específicos que confirmen la validez de aquellos valores.

### **Revisión 1 (2019)**

La gran modificación realizada en la primera revisión del modelo, corresponde al retardo de degradación del rechazo de bioestabilizado. Lo anterior se debe a que esta fracción viene parcialmente degradada por el proceso al que es sometida previo a su depósito en el vertedero y, una vez depositada, comienza a emanar metano antes que los demás residuos. Para esto, se ha incorporado un parámetro a las ecuaciones del modelo propuesto inicialmente, que mitiga la diferencia en el tiempo de degradación de retardo desde los seis hasta los tres meses.

$$Exp2 = e^{-k \cdot \frac{13-M}{12}} \quad (12)$$

*Donde:*

*M = mes en que la reacción comienza (tiempo de retardo promedio + 7)*

*k = tasa de la constante de reacción (año<sup>-1</sup>)*

Por lo tanto, considerando que el tiempo de retardo del rechazo de bioestabilizado es de tres meses, el parámetro M tiene un valor igual a 10. Lo que significa que el parámetro Exp2 equivale a 0,955.

### **Revisión 2 (2019)**

En esta revisión, se agregaron cambios que incluyeron la última actualización del modelo IPCC hasta aquel momento, donde se agregan diferentes valores de DOCf a algunas fracciones de desechos, dependiendo de los diferentes grados de descomposición.

En un principio, el IPCC recomendaba el valor de DOCf por defecto como 0,5 para todos los diferentes tipos de desechos. La actualización, en cambio, diferencia residuos según su nivel de descomposición, aquellos que son menos descomponibles como la madera adoptan un DOCf de 0,1. Los moderadamente descomponibles 0,5 (papel, textiles, etc.) y aquellos altamente descomponibles un valor de 0,7 (residuos de comida o jardín) (IPCC, 2019).

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

### **Revisión 3 (2019)**

La tercera modificación que se realizó, fue la resta del carbono eliminado a través del lixiviado, el cual no estaba siendo considerado. Para lograr esto, se recopiló la información de los datos históricos de volumen de lixiviados y Demanda Química de Oxígeno (DQO), para así obtener la cantidad de toneladas de carbono que anualmente se expulsan a través del lixiviado ( $C_{le}$ ), mediante la siguiente expresión (J.K.Park et al., 2020).

$$C_{le} = DQO * Q * 10^{-6} * \frac{3}{8} \quad (13)$$

Donde:

$C_{le}$  = carbono total en lixiviado por año (T/año)

DQO = Demanda química de oxígeno (mg/L)

$Q$  = volumen anual de lixiviado ( $m^3$ /año)

$3/8$  = factor de conversión desde DQO a C

### **Revisión 4 (2019)**

En la cuarta revisión se ha incluido un factor de Migración de Contorno (MC). Fjelsted et al. (2020) estiman que la cantidad total de metano que migra por las zonas laterales del vertedero oscila entre un 9% y 18% del metano generado. Para este estudio, se consideró una media de esos valores, adoptando un 13% como el factor MC. Este factor se aplica solamente al metano generado de la etapa Vertedero Antiguo y Vaso 1, las cuales tienen mayor profundidad que el Vaso 2, lo que significa mayor área de contacto lateral con el terreno externo.

### **Revisión 5 (2020)**

En la quinta revisión del modelo se incorporaron cambios importantes en cuanto a estimación de emisiones difusas se trata. Esta modificación se divide en 2 grupos, a los cuales se les llamara 5.1 y 5.2 a modo orientativo.

Para la modificación 5.1, se realizó la división entre el Vaso 1 y el Vertedero Antiguo, los que antes se consideraban uno solo al momento de realizar las estimaciones. Con esto, el total de etapas Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

asciende a tres, Vertedero Antiguo, Vaso 1 y Vaso 2, dando así, características y propiedades individuales a cada etapa del vertedero. Además, aquí se considera despreciable la oxidación que ocurre en la superficie del Vaso 1.

Por último, en la modificación 5.2, se ha añadido el factor de Cobertura Final (CF), este hace referencia a la cubierta final instalada sobre el Vaso 1 en el año 2012 (compuesta por gravas y geotextil), la cual minimiza las emisiones arrojadas a la superficie del vertedero y mantiene el gas generado dentro del mismo. Este factor está basado en las mediciones realizadas en campo, donde se logró estimar que solo un 2% de las emisiones totales generadas, de entre las que no están siendo capturadas por el sistema de desgasificación, pasan a través de la cubierta, es por esto que el valor que toma el parámetro CF es de 0,02.

### **Revisión 6 (2020)**

En esta última revisión, realizada en septiembre de 2020, se logró recopilar e incorporar interesante información con respecto a la fracción “rechazo de bioestabilizado”. Tras realizar el pretratamiento mecánico-biológico, se reduce considerablemente el contenido de materia orgánica y se logra la estabilización de la fracción residual de rechazo de bioestabilizado (López et al., 2018), lo que, por consiguiente, afecta el contenido de DOC y, eventualmente, el índice de degradación  $k$ .

Además, se cuenta con la composición del rechazo de bioestabilizado, obtenido del plan de residuos de la comunidad donde se ubica el vertedero en estudio (Gobierno de Cantabria, 2017), definido como: 7,46% papel/cartón, 0,3% textiles, 23,23% desechos de alimentos, 0,8% madera, 28,29% otros orgánicos putrescibles y 39,91% otros. Con estos datos es posible conocer, aproximadamente, el valor del contenido de DOC para esta fracción, el cual ronda los 0,14.

El valor del parámetro DOC para esta fracción se redujo de los 0,14 a los 0,042, siguiendo los resultados obtenidos por De Gioannis et al. (2009), donde explica que la cantidad de carbono orgánico gasificado después de 8 semanas de esta fracción es un 81% menos que la cantidad gasificada de los desechos crudos. Debido a que De Gioannis realizó su estudio en condiciones de laboratorio, se tomó una reducción de 70% para el caso de este estudio.

Por otro lado, la tasa de degradación  $k$ , antes considerada como 0,185, ahora toma un valor de 0,088. Basados en las conclusiones realizadas por Calabrò et al. (2011), su valor seguirá siendo el

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

mismo después del pretratamiento, ya que, por un lado, esta acción acelera el proceso de hidrólisis, pero por otro, se reduce el contenido de carbono, lo que supone un equilibrio entre ambos procesos. La reducción se debe principalmente a que, al igual que el valor del parámetro DOC, se calculó la constante  $k$  en base a los valores de  $k$  asignados a los residuos que componen esta fracción.

### **4.3. Herramienta de cálculo**

El modelo GIA, da lugar a una herramienta de cálculo que permite facilitar y agilizar la implementación del modelo. Además, ayuda a reducir la incertidumbre en la estimación de biogás e introducir nuevas actualizaciones al modelo. Estas actualizaciones tienen que ver, principalmente, con cambios en la gestión del vertedero que se han ido implementando en el transcurso de los años, la herramienta permite introducir estas variaciones y dar lugar a escenarios que por sí solos con el modelo se dificultarían.

A continuación, se explican brevemente las partes más importantes de la herramienta.

#### **Variables de entrada**

Para que el modelo funcione es fundamental introducir la cantidad de toneladas que se depositan en el vertedero anualmente por cada fracción de residuos, asignando a cada uno un color distintivo. Además, se deben ingresar los datos proporcionados por la empresa gestora sobre el biogás captado por el sistema de recuperación de biogás. No es necesario ingresar datos correspondientes a las condiciones climáticas del lugar, ya que los parámetros que dependen de estos datos como DOC y  $k$ , son conocidos y ya están incluidos en la herramienta.

Para los ocho tipos de fracciones depositadas en el vertedero (papel/cartón, textiles, otros putrescibles orgánicos (no alimentarios), residuos de alimentos, madera y similares, rechazo de compostaje, lodos EDAR y otros), sus cantidades deben ser ingresadas manualmente en la herramienta, en la Figura 15 se puede apreciar el formato en que se ingresan los valores referentes a las cantidades depositadas.

Clasificación	Toneladas 2017	Toneladas 2018	Toneladas 2019
Papel / Cartón	0	0	0
Textiles	8	34	22
Otros putrescibles orgánicos (no alimentarios)	101914	33814	46968
Residuos de alimentos	1708	1717	1724
Madera y similares	13083	15542	21058
Rechazo de compostaje	42054	66171	49744
Lodos EDAR	2685	2366	2058
Otros	18985	17242	19132

**Figura 15. Clasificación de residuos en herramienta de cálculo.**

La introducción de la cantidad de metano que es captado mediante los pozos de extracción y aquel que es quemado por las antorchas, al no poder ser aprovechado por los motores de generación de energía, se obtienen de manera sencilla a través del sistema de control de captura y utilización de biogás, y es proporcionado por la empresa gestora para posteriormente ser introducido manualmente en la herramienta. Esto permite, junto al porcentaje de metano que hay en el gas de vertedero, conocer la cantidad de metano captado y la eficiencia de la captación, tal como se muestra en la Figura 16.

Hasta el año 2009, se consideró que en el gas de vertedero contenía aproximadamente un 55% de metano, pero luego, desde el año 2010, la empresa gestora del vertedero implementó un sistema de captación de metano con el cual fue posible conocer el porcentaje exacto de metano contenido en el gas de vertedero captado.

Año	Sistema de desgasificación			Eficacia captación %
	Gas captado (m <sup>3</sup> )	% metano	Metano captado (t CH <sub>4</sub> )	
2007	9202820	55,00	3624	43
2008	9579445	55,00	3772	45
2009	8228977	55,00	3241	40
2010	7002373	60,88	3052	39
2011	6741234	60,98	2943	39
2012	6680208	59,07	2825	40
2013	6798496	57,30	2789	42

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

2014	5434140	56,44	2196	35
2015	4747562	58,54	1990	34
2016	4074366	58,91	1719	31
2017	4337906	57,39	1783	30
2018	3894047	56,62	1579	26
2019	4016949	57,12	1643	28

**Figura 16. Sistema de desgasificación en herramienta de cálculo.**

### Parámetros

Como se mencionó anteriormente, al estar trabajando para un vertedero en específico, el análisis de los parámetros a aplicar ya se ha realizado por lo que en la herramienta se encuentran incluidos y fijos. Sin embargo, la herramienta se puede moldear para que, en caso de necesitar realizar cambios en parámetros, valores u otros datos, esto sea haga de manera sencilla y eficaz.

Por un lado, están aquellos parámetros que se vinculan a las condiciones climáticas como la tasa de generación (k), por otro lado, aquellos que dependen de la clase de residuos como DOC y DOCf, y por último los que dependerán de la gestión del vertedero, como lo son MCF, F, CF y MC.

En la herramienta de cálculo, las variables están definidas para cada tipo de residuo como se presenta a continuación.

Componentes del residuo	Parámetros de biodegradabilidad		
	Carbono orgánico degradable, DOC (fracción)	Tasa de generación de metano, k (año <sup>-1</sup> )	
		Zona Húmeda	Zona Seca
Papel / cartón	0,40	0,06	0,04
Textiles	0,24	0,06	0,04
Residuos de alimentos	0,15	0,185	0,06
Madera y similares	0,30	0,03	0,02
Otros putrescibles orgánicos	0,20	0,1	0,05
Rechazo de compostaje	0,042	0,088	0,06
Lodos EDAR	0,061	0,185	0,06
Otros	0,04	0,03	0,02

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”



**Figura 17. Parámetros de biodegradabilidad utilizados en el modelo GIA.**

Otros parámetros		
Denominación	Abreviatura	Valor
<b>Factor de accesibilidad</b>	<b>DOCf</b>	0,5
<i>Residuos menos descomponibles como la madera</i>	<b>DOCf</b>	0,1
<i>Residuos moderadamente descomponibles papel, textiles, pañales, etc.</i>	<b>DOCf</b>	0,5
<i>Residuos altamente descomponibles como residuos de comida o de jardín.</i>	<b>DOCf</b>	0,7
<i>Otros putrescibles orgánicos</i>	<b>DOCf</b>	0,6
<b>Factor de corrección condiciones anaeróbicas</b>	<b>MCF</b>	0,95
<b>Proporción de metano en biogas generado</b>	<b>F</b>	0,5
<b>Cálculo de un menor retardo de la emisión para rechazo de compostaje (exp2)</b>	<b><math>\exp(-k*((13-M)/12))</math></b>	0,97824
<b>Mes en que se impone el comienzo de la reacción, igual al tiempo de retardo promedio + 7 (mes)</b>	<b>M</b>	10
<b>Factor de oxidación</b>	<b>OX</b>	0,1
<b>Factor cobertura final (Arcilla + Geotextil + Gravas)</b>	<b>CF</b>	0,02
<b>Factor Migración de Contorno</b>	<b>MC</b>	0,13

**Figura 18. Otros parámetros utilizados en el modelo GIA.**

### Resultados

La herramienta muestra la cantidad de emisiones difusas de metano que son liberadas por el vertedero en toneladas por año, para las diferentes etapas que ha tenido el vertedero. Para esto, solo es necesario buscar el año que se requiere analizar y su respectiva cantidad de metano emitido. En la última versión desarrollada de la herramienta de cálculo se tiene de manera separada el metano que emite cada vaso tal como se muestra en la Figura 19.

**Metano emitido superficie (t CH<sub>4</sub>)**

<b>Año</b>	<b>Total Vaso Antiguo</b>	<b>Vaso 1</b>	<b>Vaso 2</b>	<b>Total V1+V2</b>
2007	<b>370</b>	3791	0	<b>3791</b>
2008	<b>335</b>	3529	0	<b>3529</b>
2009	<b>303</b>	3857	0	<b>3857</b>
2010	<b>274</b>	3758	0	<b>3758</b>
2011	<b>248</b>	3547	1	<b>3548</b>
2012	<b>224</b>	66	37	<b>103</b>
2013	<b>203</b>	57	174	<b>230</b>
2014	<b>184</b>	59	324	<b>383</b>
2015	<b>166</b>	55	437	<b>492</b>
2016	<b>150</b>	52	574	<b>626</b>
2017	<b>136</b>	48	1087	<b>1135</b>
2018	<b>123</b>	47	1604	<b>1650</b>
2019	<b>111,30</b>	41	1639	<b>1679,86</b>

**Figura 19. Emisiones de metano estimadas con el modelo GIA.**

## **5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Existen dos tipos de resultados que se deben analizar y comparar. Por un lado, se encuentran los resultados obtenidos en las campañas y por el otro, la estimación de metano obtenida mediante el modelo GIA. El análisis que se realizará en cuanto a mediciones, se hará en base a la quinta campaña realizada en julio de 2020 la cual es la campaña más reciente y fue seleccionada para formar parte del presente trabajo.

En cuanto a la estimación de emisiones, aún no se tiene disponibilidad de todos los datos de residuos depositados en el año 2020, es por esto que se utilizarán los datos históricos que han sido recopilados desde la apertura del vertedero en 1989 hasta el año 2019, último año del que se conoce el total de toneladas de residuos depositados.

Teniendo conocimiento de lo anterior, es posible trabajar con el modelo y verificar cuales son los parámetros y decisiones tomadas con respecto a la gestión del vertedero que provocan mayores cambios en la estimación de  $\text{CH}_4$ , para ello se presenta un análisis de sensibilidad que permite visualizar ágilmente estos cambios y tener un punto de partida para la futura toma de decisiones.

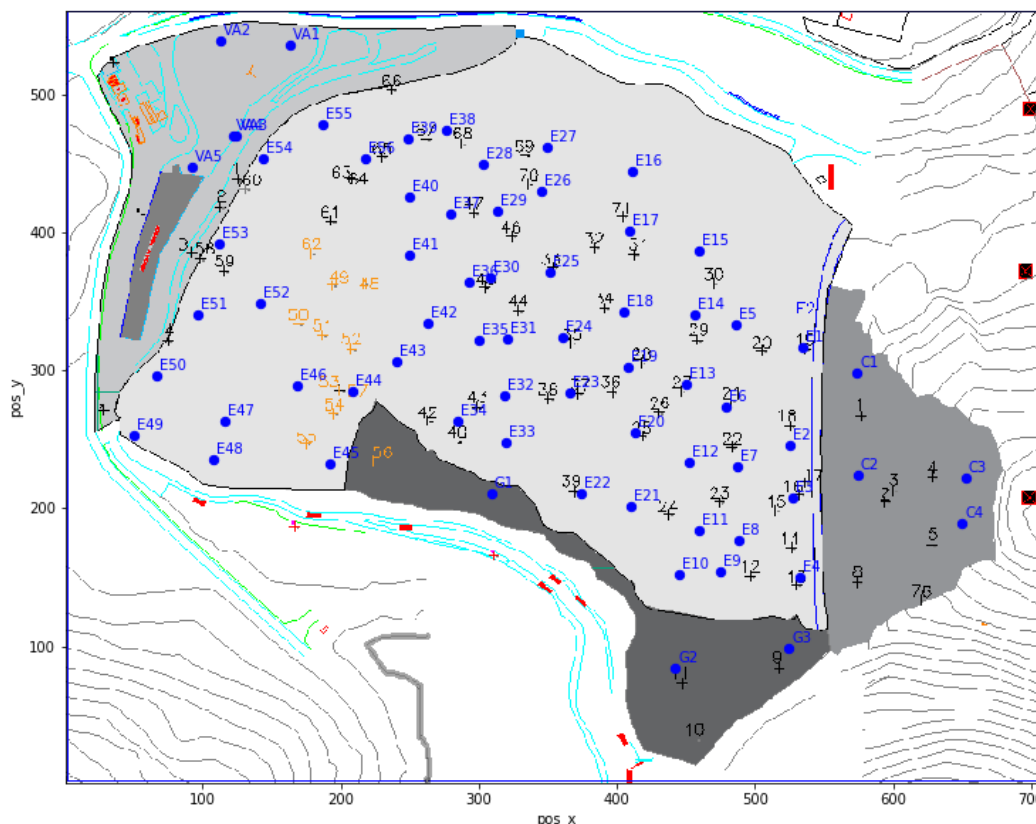
Finalmente, para comparar los resultados de estimación de emisiones y las mediciones en terreno, y descubrir si el modelo elaborado concuerda con lo que está ocurriendo en el vertedero, se utilizarán los datos obtenidos de la estimación de emisiones con los residuos depositados del año 2019, con la particularidad de que en este apartado (5.3), se utilizará la media aritmética de los datos medidos en terreno en las campañas realizadas en el año 2019 más la campaña de enero de 2020, esto permitirá abarcar las diferentes condiciones en las que se ha encontrado el vertedero con respecto a las diferencias climáticas que ocurren con los cambios de estación, ayudando a representar de manera fidedigna lo que ha ocurrido en el depósito a lo largo de un año. Cabe destacar que el trabajo realizado en la campaña de mediciones de julio 2020 será utilizado a futuro en lo que queda del proyecto del que forma parte el presente trabajo.

### **5.1. Resultados de campaña de mediciones**

De las cinco campañas que se han realizado en el vertedero, aquí se presenta la última de ellas, la cual se completó en 2 visitas al vertedero, los días 9 y 14 de julio de 2020.

La quinta campaña al vertedero constó de la medición de 68 puntos, 43 el primer día, todos ellos Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

en la Zona de explotación, y los 25 restantes el segundo día, realizándose 13 de ellos en la Zona de explotación y el resto repartidos entre Vertedero antiguo, Zona de gravas y Caballón de cierre. En la Figura 20, se pueden apreciar todos los puntos donde se realizaron mediciones en la quinta campaña realizada al vertedero, en azul se muestran los puntos medidos, en negro las chimeneas conectadas y en naranja aquellas que estaban desconectadas, pero tapadas evitando que el gas escapara.



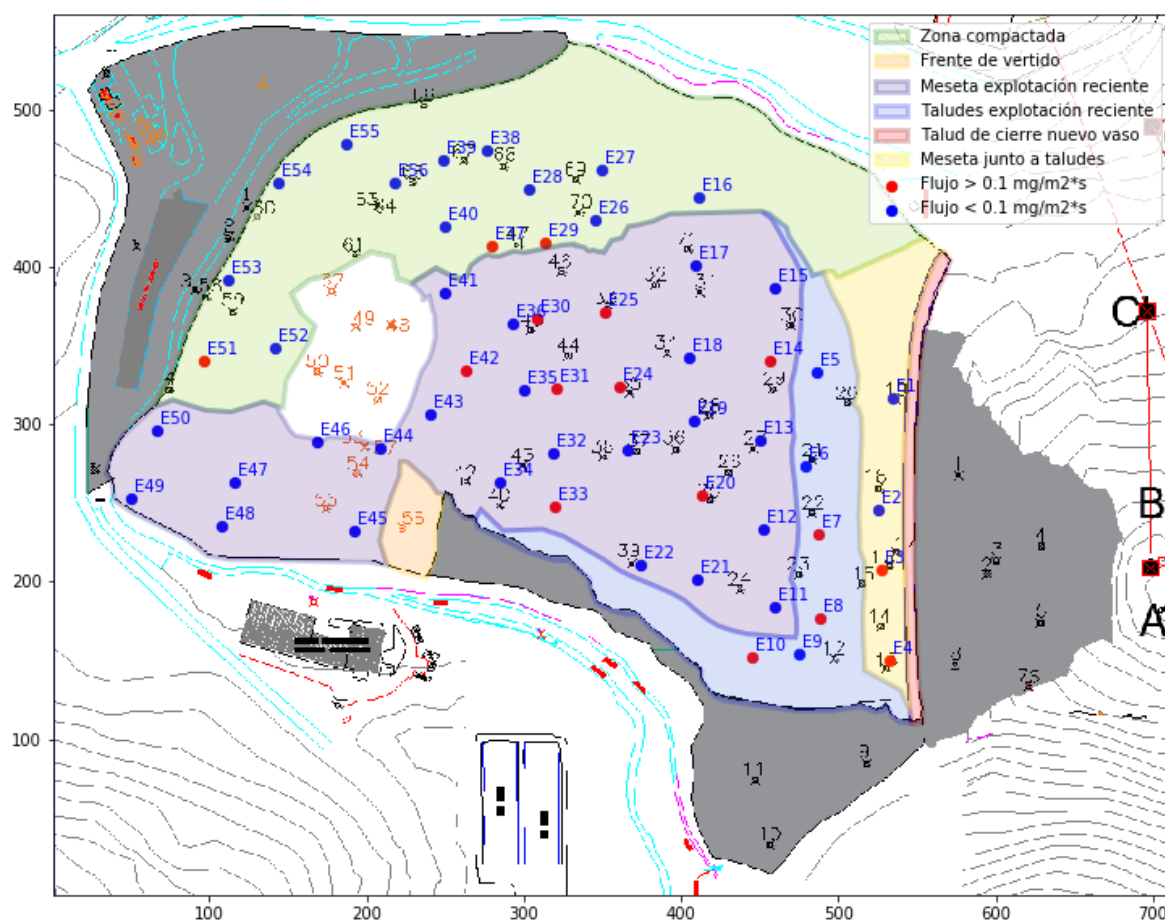
**Figura 20. Localización de los puntos medidos en la campaña de julio 2020. (fuente: GIA, 2020)**

### Zona de explotación

En la Zona de explotación se tomó la medida de 56 puntos, repartidos en cuatro subzonas: Meseta junto a taludes, Talud de explotación reciente, Meseta de explotación reciente y Zona compactada. De las otras dos subzonas que componen la superficie de la Zona de explotación no se realizaron medidas, en el frente de vertido por temas de seguridad y en el Talud de cierre debido a que aún no entra en operación, por lo tanto, no hay residuos en ella.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG "Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero"

De entre los 56 puntos medidos, 16 de ellos han resultado ser *HotSpot*, sobrepasando los límites de emisiones establecidos por las normativas de referencia que fueron explicados en el apartado 3.3. Mientras que otros 13 puntos, presentan un flujo de emisión tan bajo que se les asigna un valor por defecto entregado como recomendación por la normativa de referencia igual a  $0,00005 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ . Esto deja un total de 40 puntos con valores aceptables de emisiones difusas de metano, en la Figura 21 se muestran los puntos medidos en cada subzona, donde se destacan en rojo los que exceden los límites establecidos por la normativa.



**Figura 21. Puntos de muestreo de emisiones en la Zona de explotación. (fuente: GIA, 2020)**

Con los resultados anteriores, de las cuatro subzonas que componen la Zona de explotación, solamente en la Meseta junto a taludes (flujo igual a  $0,09964 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ ) se cumplen las condiciones, entregando valores dentro de los márgenes tomados como referencia. Es por esto que, el promedio final de la Zona de explotación excede el rango de emisiones difusas recomendado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

presentando un flujo de 0,1556 mg/m<sup>2</sup>/s. En la Tabla 4 se reflejan los puntos que han resultado sobrepasar el límite de referencia (0,1 mg/m<sup>2</sup>/s).

**Tabla 4. Valores de aquellos puntos que exceden los límites de referencia para la zona en explotación (fuente: GIA, 2020)**

Subzona	Punto	Flujo CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> /s)
Meseta junto a taludes	E3	0,179
	E4	0,205
Talud de explotación reciente	E7	0,209
	E8	0,138
	E10	1,039
Meseta de explotación reciente	E14	0,136
	E20	0,127
	E24	0,216
	E25	0,110
	E30	0,201
	E31	3,442
	E33	0,930
	E42	0,120
Zona compactada	E29	0,964
	E37	0,186
	E51	0,250

#### Vertedero antiguo

En el Vertedero antiguo, se realizó la medición de cinco puntos, tres de ellos (VA1, VA2 y VA5), han sido reemplazados por el flujo de 0,0005 mg/m<sup>2</sup>/s al arrojar resultados demasiado bajos durante la medición en terreno, mientras que los otros dos (VA3 y VA4), sobrepasan ampliamente el límite máximo que establece la normativa para zonas con cobertura definitiva (0,001 mg/m<sup>2</sup>/s). El promedio final de la zona Vertedero antiguo arroja un valor de flujo de metano emitido de 0,23192 mg/m<sup>2</sup>/s, lo cual es bastante mayor al establecido como referencia.

**Tabla 5. Flujo de emisión de los puntos medidos en el Vertedero Antiguo. (fuente: GIA, 2020)**

Zona	Punto	Flujo CH <sub>4</sub> mg/m <sup>2</sup> /s
------	-------	--

Vertedero antiguo	VA1	0,00005
	VA2	0,00005
	VA3	0,02445
	VA4	1,13498
	VA5	0,00005
Promedio		0,23192

### Zona sin explotar

Para la Zona sin explotar, donde se realizó la medida en tres puntos, uno de ellos (G1) ha sido reemplazado por un flujo igual a 0,00005 mg/m<sup>2</sup>/s por el mismo motivo que se ha mencionado con anterioridad, los otros dos puntos (G2 y G3), sobrepasan los límites máximos para zonas con coberturas permanentes, es decir 0,001 mg/m<sup>2</sup>/s. Resultando así, un promedio de flujo de metano de 0,00587 mg/m<sup>2</sup>/s en la zona, casi seis veces mayor al tomado como referencia.

**Tabla 6. Flujo de emisión de los puntos medidos en la Zona sin explotar. (fuente: GIA , 2020)**

Zona	Punto	Flujo CH <sub>4</sub> mg/m <sup>2</sup> /s
Zona sin explotar	G1	0,00005
	G2	0,01517
	G3	0,00241
Promedio		0,00587

### Caballón de cierre

Finalmente, en la zona del Caballón de cierre, en la cual se tomó la medida de cuatro puntos diferentes, ha promediado un flujo de metano emitido de 0,000098 mg/m<sup>2</sup>/s, lo cual se encuentra dentro de los rangos recomendados para la zona. Cabe destacar que tres de los cuatro puntos han sido reemplazados por el valor mínimo recomendado por la normativa de 0,00005 mg/m<sup>2</sup>/s debido a la baja emisión de CH<sub>4</sub> que presentan.

**Tabla 7. Flujo de emisión de los puntos medidos en el Talud de cierre. (fuente: GIA, 2020)**

Zona	Punto	Flujo CH <sub>4</sub> mg/m <sup>2</sup> /s
Caballón de cierre	C1	0,00005
	C2	0,0002426

C3	0,00005
C4	0,00005
<b>Promedio</b>	<b>0,000098</b>

El análisis posterior que se realizó sobre las campañas revela que, a partir del flujo promedio de cada zona, se puede conocer las emisiones anuales equivalentes en toneladas al año. Para el caso de la quinta campaña, la suma de las emisiones anuales equivalentes de las cuatro zonas da un total de 814, 6 [T/año] de emisiones difusas, valor que se ha mantenido similar desde la primera campaña realizada dentro del proyecto en mayo de 2019, siendo la cuarta campaña la única que varía con respecto a los demás resultados obtenidos, en la que se obtuvo un total de 388,9 [T/año] de emisiones difusas.

A continuación, en la Tabla 8, se presenta un resumen de las emisiones superficiales medidas en la quinta campaña realizada en el vertedero.

**Tabla 8. Emisiones superficiales obtenidas en la quinta campaña al vertedero (fuente: GIA, 2020)**

<b>Zona</b>	<b>Flujo CH4 (mg/m2/s)</b>	<b>Emisión CH4 (T/año)</b>
Zona de explotación	0,155	670,1
Meseta junto a taludes	0,099	28,57
Talud de explotación reciente	0,232	127,34
Meseta de explotación reciente	0,187	379,47
Zona compactada	0,097	134,72
Vertedero antiguo	0,232	139,74
Zona sin explotar	0,005	4,68
Talud de cierre	0,00009	0,07
<b>Total vertedero</b>		<b>814,6</b>

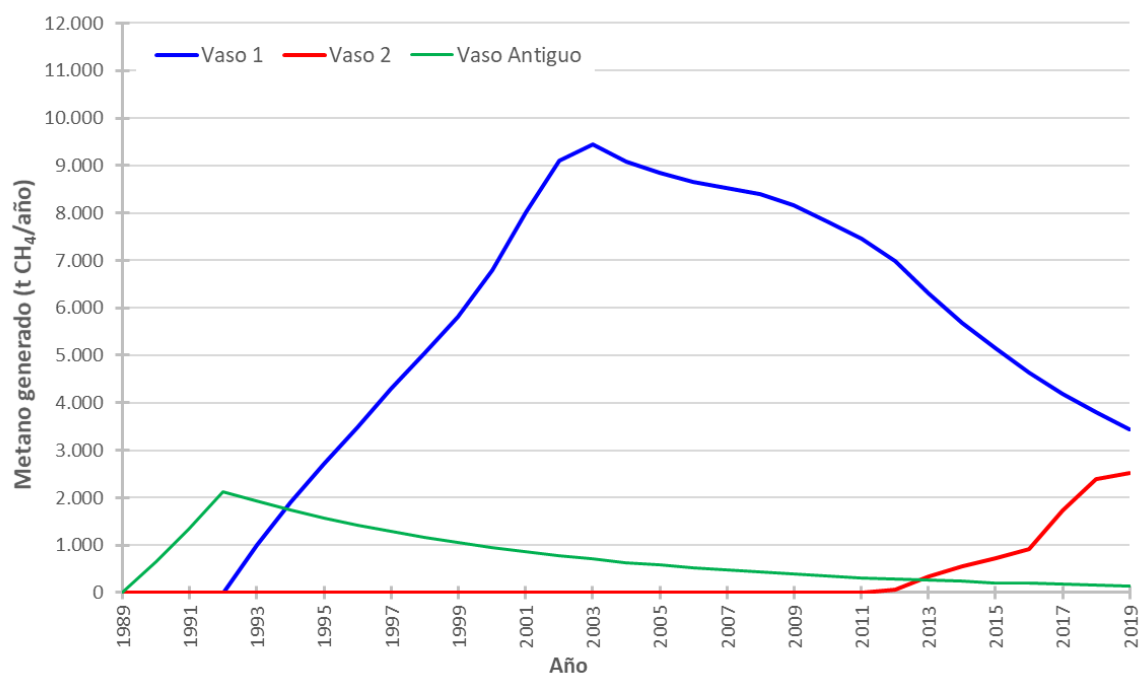
## 5.2. Resultados de estimación de biogás

Utilizando la herramienta de cálculo, con el modelo actualizado a su última versión incluyendo todas las modificaciones realizadas y según las condiciones en las que se encuentra el vertedero se obtuvieron los siguientes gráficos y resultados.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”



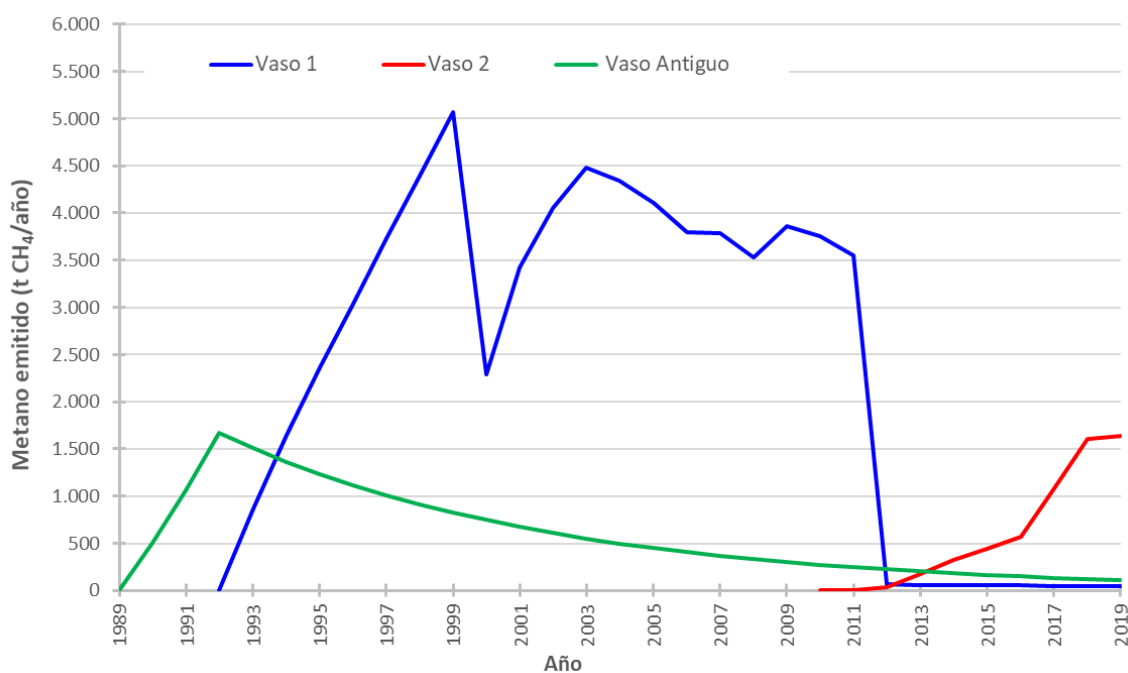
### Metano generado ( $tCH_4$ )



**Figura 22. Grafica de resultados de la generación de metano estimada con el modelo GIA (fuente: GIA, 2020)**

De acuerdo a los resultados obtenidos y el análisis que se puede realizar de la gráfica de generación de metano, es posible observar que, con el crecimiento del vertedero, la apertura del Vaso 1 y el aumento de la población que vertía sus residuos, la generación de metano aumenta considerablemente hasta el año 2008, momento en que se incluye el sistema de reciclado y compostaje, ocasionando una reducción en la generación de biogás en el Vaso 1. La curva de color rojo hace referencia a la generación de metano del Vaso 2, a partir de su apertura en el año 2011. Este es el Vaso que se encuentra en explotación actualmente.

### Metano emitido ( $tCH_4$ )



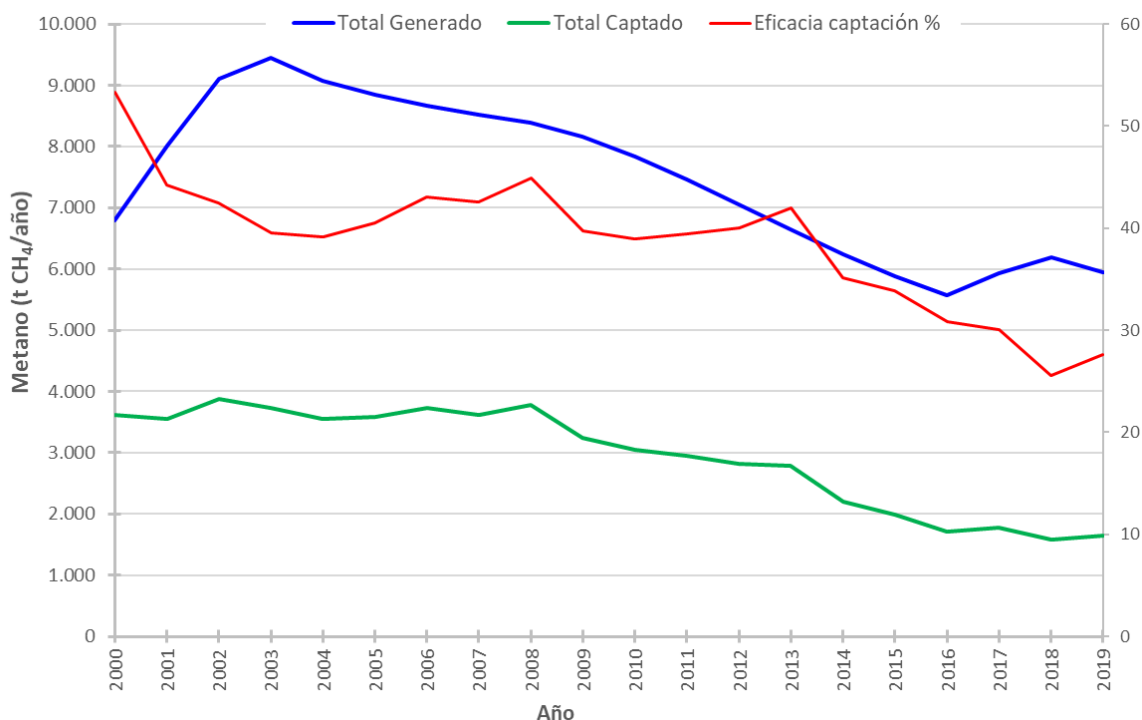
**Figura 23. Grafica de resultados de emisión de metano estimada con el modelo GIA (fuente: GIA, 2020)**

Como se puede desprender de la gráfica, las emisiones en un principio correspondían solamente al Vaso antiguo, hasta la apertura y funcionamiento del Vaso 1. En este, las emisiones comenzaron siendo considerablemente altas y disminuyen en el año 2000, esto ocurre debido a que desde la apertura del Vaso 1 hasta ese año, no existía un sistema de desgasificación. La emisión de metano por parte del Vaso 1 comienza una drástica disminución debido a la cobertura final impermeabilizante que se aplicó en el sector y la apertura del Vaso 2 sobre él. Actualmente, es el Vaso 2 el que emite una mayor cantidad de biogás a la atmosfera al estar en explotación.

### Recuperación de biogás

El gas captado es un valor entregado por la empresa gestora del vertedero, de la que se tienen datos desde el año 2000 en adelante. Se estima, al no tener datos concretos, entre los años 2000 y 2009 que el porcentaje de metano en el gas es de un 55%. Sin embargo, desde el año 2010 en adelante, se tiene la información exacta del porcentaje de metano que hay en el gas captado. Conociendo estos datos, es posible determinar el metano captado por el sistema de

desgasificación y a su vez, la eficiencia de captación.



**Figura 24. Grafica de resultados de recuperación de biogás estimada con el modelo GIA (fuente: GIA, 2020)**

### 5.3. Análisis y comparación de resultados

Tomando toda la información recopilada de las diferentes modificaciones realizadas al modelo GIA desde su creación hasta ahora, es posible realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros introducidos y utilizados para estimar las emisiones difusas de metano existentes en el vertedero en cuestión. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la estimación de emisiones difusas de metano a la atmosfera para el año 2019, según los diversos parámetros que han sido incorporados al modelo GIA.

Cabe destacar que los resultados y análisis que se presentan a continuación son realizados con los resultados obtenidos cada modificación realizada al modelo por separado, pudiéndose verificar cuan sensible es el modelo a cada uno de los cambios realizados. Esta es una de las ventajas que

tiene la herramienta de cálculo elaborada, ya que permite realizar este tipo de análisis muy ágil y claramente.

En la versión inicial, según las condiciones en las que se encuentra el vertedero y los parámetros que se mencionaron anteriormente (Capítulo 4.2. Modelo GIA), la estimación de biogás para el año 2019 alcanzó un total de 6.268 toneladas de CH<sub>4</sub> al año, valor que, comparándolo con las mediciones realizadas en terreno en las cinco campañas, se aleja considerablemente de la realidad.

Con la introducción de la primera modificación (retardo de degradación de la fracción “rechazo de compostaje”), se logró la reducción de la estimación de emisiones hasta las 4.659 toneladas de metano al año, la gran cantidad que se logró reducir al introducir este nuevo valor para la fracción rechazo de bioestabilizado, se debe a que esta fracción compone una parte importante del total de residuos depositados en el vertedero, y al ser depositada en un avanzado estado de degradación, esta fracción no aporta el 100% del gas que podría generar. Es posible afirmar que el modelo es muy sensible a los cambios que ocurran con este residuo debido a la gran cantidad de rechazo de bioestabilizado que se vierte en el sitio.

En la revisión 2 del modelo, siguiendo las recomendaciones del IPCC, en los cambios realizados para el parámetro DOCf, como se explicó en el capítulo 4.2. Modelo GIA, se obtuvo un aumento en la estimación de las emisiones difusas de biogás, pasando de las 6.268 del modelo inicial a las 6.619 toneladas de metano. Este aumento se debe a que fracciones con un importante aporte de residuos al vertedero como lo son los “*Putrescibles orgánicos*” sufren un aumento en el parámetro DOCf, mientras que aquellos que sufren una disminución en este parámetro se encuentran en menor cantidad en el vertedero.

Durante la tercera revisión del modelo, con la introducción de la resta del biogás que se evacua a través del lixiviado se tiene una leve disminución del metano emitido en el año 2019, pasando desde las 6.268 toneladas a las 6.202 toneladas. La leve reducción en la estimación de metano se debe a que el carbono contenido en el lixiviado representa menos de un 8% del total del carbono contenido en los desechos depositados.

En la cuarta revisión, donde se incluye el factor de migración de contorno, se ha logrado llegar a una estimación de emisiones de 5.774 toneladas de CH<sub>4</sub> al año, esta disminución se debe a la consideración del gas que se escapa por los bordes del vertedero.

Separando las modificaciones realizadas durante la quinta revisión en 5.1 y 5.2, se obtienen los Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

siguientes resultados.

En la modificación 5.1, mediante la separación del Vaso Antiguo y el Vaso 1, se obtiene un aumento en estimación de emisiones difusas de metano que alcanza las 6.599 toneladas para el año 2019, es decir, un pequeño aumento en las emisiones estimadas. Esto se debe al considerar como despreciable la oxidación en la superficie del Vaso 1, emitiéndose una mayor cantidad de metano a la atmósfera.

La modificación 5.2, que además de la separación de vasos incluye la introducción del parámetro Factor de Cobertura Final. Aplicado al Vaso 1, se logra una disminución de emisiones desde las 6.599 toneladas anuales hasta las 3.361 toneladas al año. Esto se debe a que, al aplicar este nuevo factor de cobertura final al Vaso 1, prácticamente este último no emite gas a la atmosfera, lo cual significa una importante disminución en la estimación de emisiones. También es importante recordar que el Vaso 2 se encuentra sobre el Vaso 1 por lo tanto las emisiones a la atmosfera son aún menores.

Utilizando la información recopilada durante la última revisión, y considerando la sensibilidad que tienen los resultados de la estimación a los cambios realizados a la fracción rechazo de bioestabilizado, es que se logró una disminución desde las 6.268 toneladas anuales de metano hasta las 3.713 toneladas al año. Esto se debe a la importante disminución que se realizó en el parámetro DOC y también al índice k.

A continuación, en la Tabla 9, se presenta un resumen de lo descrito anteriormente

**Tabla 9. Comparación de resultados de estimación de emisiones entre las diferentes versiones del modelo GIA.**

Versión del Modelo	Toneladas de metano	Variación con respecto a la versión inicial
Versión inicial (V.I)	6.268	0%
V.I + Retardo rechazo de compostaje	4.659	-25,60%

V.I + Cambios en DOCf (IPCC 2006)	6.619	+5,60%
V.I + Resta de biogás en lixiviado	6.202	-1,05%
V.I + Factor de migración de contorno (FMC)	5.774	-7,88%
V.I + Separación de Vasos Antiguos	6.599	+5,28%
V.I + Separación de Vasos Antiguos y Factor de Cobertura Final en Vaso 1	3.361	-46,38%
V.I + Reducción DOC y k de rechazo de bioestabilizado	3.713	-40,76%

Luego de analizar cada uno de los parámetros que se introdujeron en el modelo, es posible afirmar que uno de los parámetros más sensibles es el de cobertura final agregado en la quinta modificación realizada al modelo. Así mismo, es claro que cualquier modificación que se haga en los parámetros que se vinculan con la fracción rechazo de bioestabilizado, provocará grandes variaciones en la estimación de emisiones de metano en el vertedero.

Por otro lado, uniando todas las modificaciones que ha sufrido el modelo desde su creación en la herramienta de cálculo es posible obtener la siguiente gráfica comparativa entre el modelo inicial y el modelo actual (Figura 25), donde además se pueden apreciar acciones realizadas en la gestión del vertedero que significaron un cambio importante en las emisiones del mismo, como lo son:

### **Sistema de recuperación de biogás**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

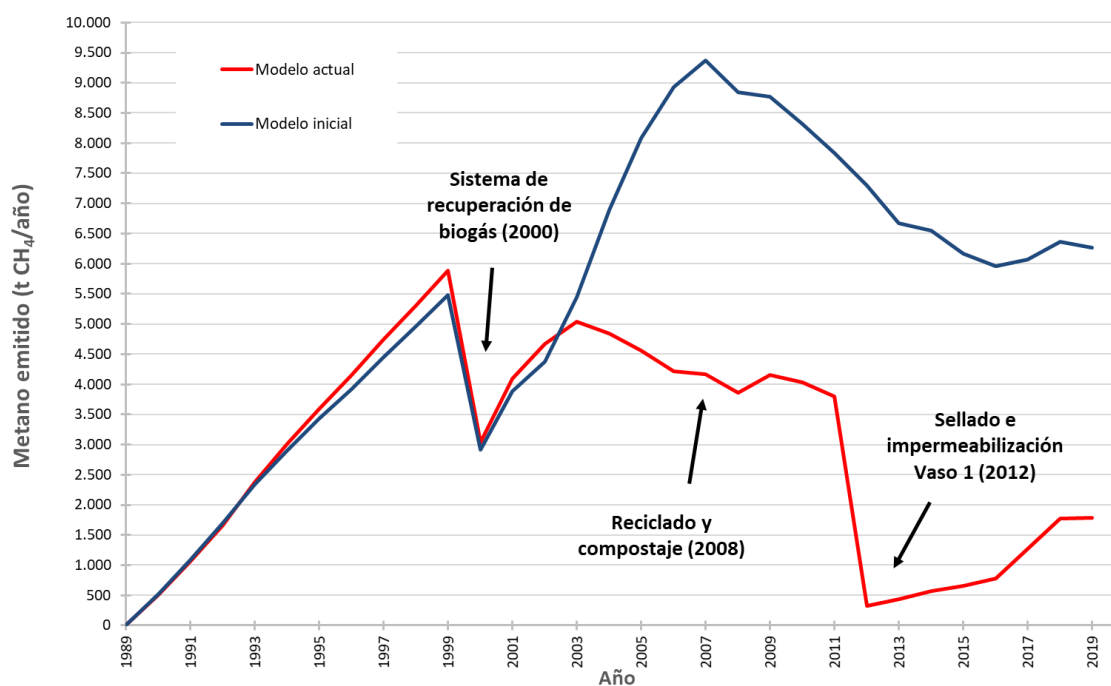
Instalación realizada en el año 2000, la cual significó una reducción drástica en las emisiones de CH<sub>4</sub>.

### Reciclado y compostajes de residuos

Trabajos iniciados en el año 2008, donde se redujo la cantidad de contenido orgánico degradable y los residuos vertidos, lo que produce menor cantidad de biogás y, por consiguiente, la disminución de emisiones al entorno.

### Sellado e impermeabilización del Vaso 1

Incluido en el año 2012 y como se explicó anteriormente, controló significativamente las emisiones de biogás a la atmosfera.



**Figura 25. Grafica comparativa de los resultados de la estimación de metano emitido entre el modelo inicial y su última versión.**

Como se puede observar en la Figura 25, el modelo actualizado estima unas emisiones menores que el creado inicialmente. Estos avances y mejoras en los resultados de estimación se deben, en primer lugar, a la actualización de los parámetros que por defecto proponía el IPCC y, en segundo

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

lugar, por la inclusión de nuevos parámetros y variables que permiten representar específicamente las condiciones en las que se encuentra el vertedero estudiado.

Con el objetivo de comparar los resultados y comprobar que el nuevo modelo, con parámetros actualizados, obtiene resultados más próximos a la realidad se presenta la Tabla 10.

**Tabla 10. Comparación entre mediciones de campo y estimaciones de metano utilizando el modelo inicial y su versión más actualizada.**

	Medidas de campo	Estimación modelo inicial	Estimación modelo actual
Emisiones CH <sub>4</sub> año 2019 (T)	850	6.268	1.791

Para realizar esta comparación se utilizó, por un lado, la media aritmética de las emisiones obtenidas durante tres campañas, dos de ellas realizadas en el año 2019 (mayo de 2019 con emisiones iguales a 785,16 [T/año] y Julio de 2019 con emisiones iguales a 921, 35 [T/año]) y la otra en enero de 2020 (Emisión igual a 844,1 [T/año]), y por el otro, la estimación en ambos modelos, inicial y actualizado, con los datos de los desechos depositados durante el año 2019.

Como se puede observar, el nuevo modelo estima valores más cercanos a lo medido en terreno, reduciendo las emisiones en un 71,47% y entregando una considerable disminución en el error de la estimación inicial. A pesar de estos resultados favorables, aún es posible ver que las estimaciones realizadas por el modelo proporcionan valores mayores a las mediciones que se realizaron en las campañas al vertedero.

Finalmente, sobre la comparación de resultados obtenidos tanto en las estimaciones de emisiones de metano mediante el modelo GIA y las mediciones realizadas en las campañas al vertedero, es posible afirmar que estos son más próximos y resulta interesante continuar con su desarrollo, para así afinar detalles y lograr una exactitud mayor. También puede ser el punto de inicio para la extensión de su aplicación en otros vertederos que aun estén estimando su potencial de generación y emisión de biogás bajo los parámetros y recomendaciones que por defecto entrega el IPCC.



## 6. TRABAJO FUTURO

Como se ha mencionado anteriormente, el presente trabajo forma parte de un proyecto más amplio acordado entre la Universidad de Cantabria y la empresa encargada de la gestión del vertedero en estudio. Este proyecto busca, como interés general, mejorar los métodos de estimación de emisiones difusas en vertederos.

Parte de este trabajo se ha enfocado en el avance en los conocimientos y técnicas de estimación de biogás de las que se tenía registro, pero para lograr resultados aún más precisos, todavía queda trabajo por hacer. El proyecto contempla la realización de al menos ocho campañas de medida de emisiones difusas en la superficie del vertedero, repartidas en los dos años que se han considerado necesarios, de estas se han realizado cinco y se espera que en los próximos meses se completen las siguientes campañas.

Es por esto que la cuarta y quinta campaña de medida de emisiones realizadas al vertedero entrarán a formar parte de un estudio de análisis y comparación posterior, puntualmente cuando se conozcan las cantidades vertidas de cada una de las fracciones de residuos para los 12 meses del año 2020.

Durante el tiempo que tome realizar las campañas de medida se seguirá trabajando en la implementación de mejoras al modelo de estimación, buscando lograr la representación más exacta posible de lo que ocurre en el depósito. Todas las mejoras se irán incluyendo en la herramienta de cálculo que se ha elaborado con el fin de tener un sistema de trabajo eficiente.

Una vez realizadas todas las campañas que se consideren necesarias para evaluar de manera correcta lo que ocurre en el vertedero, se pretende elaborar un nuevo protocolo mejorado de cuantificación de emisiones difusas en el vertedero con medidas de campo, además se tendrá una nueva herramienta de cálculo optimizada para estimar las emisiones de biogás emitidas desde el vertedero en estudio. Estas nuevas técnicas y conocimientos adquiridos, permitirán servir como apoyo para implementar mejoras en la operación de las instalaciones con las que cuenta el vertedero y también en los sistemas de gestión de residuos, siendo un apoyo en el diseño de medidas que permitan reducir el impacto ambiental y la huella de carbono que actualmente produce el vertedero.

## 7. CONCLUSIÓN

El trabajo realizado ha servido para estimar el potencial de generación y emanación de biogás de un vertedero específico ubicado en el norte de España. Apoyados tanto en la bibliografía científica como en mediciones realizadas en el propio vertedero, se ha mejorado un modelo matemático basado en el modelo propuesto por la directiva IPCC y una herramienta de cálculo que, junto con información histórica sobre los residuos depositados en el vertedero y la gestión realizada en el mismo desde su apertura en el año 1989 hasta la fecha, permite estimar la cantidad de metano generado y emitido a la atmósfera de manera mucho más precisa de lo que se tenía conocimiento.

Para realizar la estimación se han utilizado los datos históricos de los residuos depositados en el vertedero, el cual de manera orientativa se ha dividido en tres partes, Vertedero Antiguo operativo entre los años 1989 y 1991, Vaso 1 entre los años 1991 y 2010 y el Vaso 2 operativo entre el año 2011 y 2019, último año del que se conocen las cantidades de residuos vertidos. Al trabajar específicamente en un vertedero seleccionado, para crear el modelo y la herramienta de cálculo, además ha sido posible utilizar la información conocida sobre las características del vertedero, las condiciones climáticas del sitio y los diferentes cambios realizados en el depósito por parte de la empresa gestora, a lo que se incluye la información base sobre parámetros entregada por la directiva del IPCC.

Tomando como referencia el año 2019, es posible observar que las modificaciones incluidas en el modelo han entregado resultados positivos, disminuyendo la estimación de metano emitido a la atmósfera desde las 6.268 a las 1.791 toneladas al año, valor que se acerca más a lo que sucede en el vertedero, realidad conocida gracias a las 5 campañas de medición de emisiones superficiales que hasta ahora han sido realizadas como parte del proyecto.

Debido a la facilidad que otorga la herramienta de cálculo para introducir nuevas variables y parámetros al modelo elaborado, ha sido posible realizar una evaluación de sensibilidad de parámetros con el fin de detectar aquellos cambios producidos en la gestión del vertedero que más influyen en las emisiones de biogás al entorno.

Gracias a esto, se ha definido a la fracción “rechazo de bioestabilizado” como aquella que tiene una mayor sensibilidad a los cambios que se puedan incorporar, esto debido a que el depósito recibe en su mayoría residuos de este tipo. Cabe destacar que esta fracción de residuos no es

considerada por el IPCC, por lo que el trabajo realizado para dar valores a los parámetros aún es material de estudio. Esto significa que existe una variada cantidad de opciones que se pueden barajar en cuanto a esta fracción y a los resultados de estimación que se realicen a futuro.

Además, ha sido posible rescatar diversa información en cuanto a los parámetros que han sido utilizados. Debido a la singular configuración que presenta el vertedero y los diferentes cambios que han ido siendo incluidos en el a través de los años, se han incorporado parámetros que la directiva del IPCC no tenía en cuenta en su modelo. Aquí es posible encontrar los factores de migración de contorno y el factor de cobertura final aplicado al Vaso 1, ambos factores reducen la estimación del metano que se emite a la atmósfera, siendo el que más provoca cambios en la estimación, el factor de cobertura final que se debe a que el Vaso 2 se encuentra construido sobre el Vaso 1 con una capa de cobertura impermeabilizada que impide considerablemente el paso del biogás a través de ella.

Varios parámetros entregados por defecto en el modelo inicial propuesto por el IPCC, han sido actualizados o bien, se han incorporado nuevos basados en actual bibliografía científica. Esto es debido a otros factores que, al realizar estudios de este tipo, deberían ser tomados en consideración y analizados con mayor detalle, como lo son:

- 1.- La configuración del vertedero; no tan solo importando que tan profundo o amplio es el depósito, si no tomando en cuenta la manera en que este ha sido distribuido y puesto sobre el terreno
- 2.- La gestión histórica del vertedero; además de fijar importancia en la cantidad de residuos depositados año tras año, se deben tener en consideración los sistemas de desgasificación y extracción de lixiviado que han sido instalados en el vertedero, además de las diferentes coberturas aplicadas a cada sector y los cambios que se incorporen con los avances en tecnología como lo que sucedió en este depósito con la fracción rechazo de bioestabilizado.

Finalmente, si bien es difícil encontrar un modelo que entregue valores precisos en la estimación de biogás emitido a la atmósfera, es claro que el modelo elaborado para la realización de este proyecto ha logrado conseguir resultados satisfactorios, ya que reduce considerablemente las estimaciones con respecto a lo que está propuesto por defecto. Teniendo conocimiento de lo anterior es posible recomendar que para trabajos futuros realizados en otros vertederos se busque modelizar específicamente para las características de cada depósito, teniendo en consideración

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

los resultados obtenidos en el presente trabajo en cuanto a conocimiento, gestión y aprovechamiento del biogás generado dentro del vertedero.

## 8. REFERENCIAS

- Abichou, T., Chanton, J., Powelson, D., Fleiger, J., Escoriza, S., Lei, Y., & Stern, J. (2006). Methane flux and oxidation at two types of intermediate landfill covers. *Waste Management*, 26(11), 1305–1312. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.11.016>
- Abushammala, M. F. M., Basri, N. E. A., Irwan, D., & Younes, M. K. (2014). Methane oxidation in landfill cover soils: A review. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.5572/ajae.2014.8.1.001>
- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Ojeda-Benitez, S., & Cruz-Sotelo, S. (2011). *Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás*. 15(1), 37–45.
- Ancell Trueba, R., & Célis Díaz, R. (2013). Termoplumiometría de Cantabria durante el periodo 1981-2010. *Unidad de Estudios y Desarrollos, Sección de Climatología, Nota Técnica*(10), 1–20. [http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/NT\\_10\\_AEMET/NT\\_10\\_AEMET.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/publicaciones/NT_10_AEMET/NT_10_AEMET.pdf)
- Bian, R., Xin, D., & Chai, X. (2018). A Simulation model for estimating methane oxidation and emission from landfill cover soils. *Waste Management*, 77, 426–434. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.029>
- Bogner, J., & Matthews, E. (2003). Global methane emissions from landfills: New methodology and annual estimates 1980-1996. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2). <https://doi.org/10.1029/2002gb001913>
- Calabrò, P. S., Orsi, S., Gentili, E., & Carlo, M. (2011). Modelling of biogas extraction at an Italian landfill accepting mechanically and biologically treated municipal solid waste. *Waste Management and Research*, 29(12), 1277–1285. <https://doi.org/10.1177/0734242X11417487>
- Cdm, C., Eb, E. B., & Annex, R. (2011). *Methodological Tool “Emissions from solid waste disposal sites.”*
- De Giannis, G., Muntoni, A., Cappai, G., & Milia, S. (2009). Landfill gas generation after mechanical biological treatment of municipal solid waste. Estimation of gas generation rate constants. *Waste Management*, 29(3), 1026–1034. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.016>
- Direct Industry. (n.d.). *Detector de gas de metano, Laser One - Huberg*. Retrieved September 7, 2020, from <https://www.directindustry.es/prod/huberg/product-56732-1310721.html>
- Environment Agency (EA) & Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (2010). LFTGN07: Guidance on monitoring landfill gas surface emissions. *Gas Guidance*, 67.
- GIA - Grupo de Ingeniería Ambiental. (2019a). *Descripción del vertedero de Meruelo*. 1–9.
- GIA - Grupo de Ingeniería Ambiental. (2019b). *Protocolo para evaluación experimental de*
- Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

*emisiones difusas en vertedero. 11.*

- GIA - Grupo de Ingeniería Ambiental. (2020). *Resultados experimentales de evaluación de emisiones difusas en un vertedero específico. 5.*
- Gobierno de Cantabria. (2017). *Plan de residuos de la Comunidad Autónoma de Cantabria 2017 - 2023. 210.*
- Gómez Noriega, D. (2016). *Fuentes orales: El vertedero de Meruelo. 50.*
- González, S. M. (1997). *Producción Y Recuperación Del Biogás En Vertederos Controlados De Residuos Sólidos Urbanos: Análisis De Variables Y Modelización.*
- Instituto Geográfico Nacional. (2014). *Evapotranspiración Potencial. 1–3.*
- IPCC. (2006). Datos de generación, composición y gestión de desechos. *Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, V, 1–24.* <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol5.html>
- MARE. (2013). *Complejo Medioambiental de Meruelo.* <https://www.mare.es/que-hacemos/residuos/instalaciones-de-tratamiento/complejo-medioambiental-de-meruelo>
- Ministerio del medio ambiente. (2002). Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre por la que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. *Boletín Oficial Del Estado, 1697, 29 de enero, 3507–3521.* <http://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2002-1697>
- Oonk, H. (2010). Methods to quantify generation, oxidation and emission. *Literature Review: Methane from Landfills, April, 75.* <https://doi.org/10.1177/1350650113506570>
- Pipatti, R., Svandal, P., Wagner, J., Oonk, H., Scheehle, E., Sharma, C., Smith, A., & Yamadad, M. (2006). Eliminación De Desechos Sólidos. *Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, 44.*
- Sánchez, C., Narros, A., Peso, I. del, Fuente, M. M. de la, & Rodríguez, E. (2016). *Emisiones superficiales de metano en vertederos. ¿Por qué y cómo cuantificarlas? 1–9.*
- Schroth, M. H., Eugster, W., Gómez, K. E., Gonzalez-Gil, G., Niklaus, P. A., & Oester, P. (2011). Above- and below-ground methane fluxes and methanotrophic activity in a landfill-cover soil. *Waste Management, 32(5), 879–889.* <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.003>
- Vadillo Abascal, J. M. (2018). *Revisión y propuesta de una metodología para la estimación de emisiones difusas de metano en un vertedero.*
- Weather Spark. (2020). *Clima promedio en San Miguel de Meruelo.* <https://es.weatherspark.com/y/37502/Clima-promedio-en-San-Miguel-de-Meruelo-España-durante-todo-el-año>

## 9. ANEJOS

### ANEJO 1. HOJA 1. ENTRADAS “MODELO GIA”

Clasificación	Toneladas 2004	Toneladas 2005	Toneladas 2006	Toneladas 2007	Toneladas 2008	Toneladas 2009
Papel / Cartón	0	0	0	0	2	7
Textiles	0	0	0	67	172	51
Otros putrescibles orgánicos (no alimentarios)	48297	52481	65420	64781	49367	43224
Residuos de alimentos	0	0	0	1616	4667	3381
Madera y similares	0	0	0	1586	4186	4876
Rechazo de compostaje	199665	194465	143738	74671	60537	56618
Lodos EDAR	26712	30691	33476	38045	32380	17240
Otros	119	204	273	39991	29740	26227
TOTAL	274674	277637	242634	180766	151311	125396

Clasificación	Toneladas 2010	Toneladas 2011	Toneladas 2012	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Papel / Cartón	7	12	11	0	0	0
Textiles	24	22	12	5	7	74
Otros putrescibles orgánicos (no alimentarios)	38636	31126	23944	25516	21912	24914
Residuos de alimentos	3566	2859	2364	1573	1404	1447
Madera y similares	4128	8720	7687	8125	8723	10036
Rechazo de compostaje	57214	48252	41950	34492	35445	36605
Lodos EDAR	6694	5566	5029	3158	3067	3178
Otros	27393	23950	23098	18612	21485	19428
TOTAL	110269	96557	80996	72869	70558	76254

Clasificación	Toneladas 2016	Toneladas 2017	Toneladas 2018	Toneladas 2019
Papel / Cartón	0	0	0	0
Textiles	46	8	34	22
Otros putrescibles orgánicos (no alimentarios)	111412	101914	33814	46968
Residuos de alimentos	1826	1708	1717	1724
Madera y similares	10454	13083	15542	21058
Rechazo de compostaje	42838	42054	66171	49744
Lodos EDAR	2729	2685	2366	2058
Otros	19429	18985	17242	19132

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

TOTAL	169304	161451	119645	121574
-------	--------	--------	--------	--------

## ANEJO B. HOJA 2. PARAMETROS “MODELO GIA”

Componentes del residuo	Parámetros de biodegradabilidad		
	Carbono orgánico degradable, DOC (fracción)	Tasa de generación de metano, k (año <sup>-1</sup> )	
		Zona Húmeda	Zona Seca
Papel / cartón	0,40	0,06	0,04
Textiles	0,24	0,06	0,04
Residuos de alimentos	0,15	0,185	0,06
Madera y similares	0,30	0,03	0,02
Otros putrescibles orgánicos	0,20	0,1	0,05
Rechazo de compostaje	0,042	0,088	0,06
Lodos EDAR	0,06	0,185	0,06
Otros	0,04	0,03	0,02

Otros parámetros		
Denominación	Abreviatura	Valor
<b>Factor de accesibilidad</b>	<b>DOCf</b>	0,5
<i>Residuos menos descomponibles como la madera</i>	<b>DOCf</b>	0,1
<i>Residuos moderadamente descomponibles papel, textiles, pañales, etc.</i>	<b>DOCf</b>	0,5
<i>Residuos altamente descomponibles como residuos de comida o de jardín.</i>	<b>DOCf</b>	0,7
<i>Otros putrescibles orgánicos</i>	<b>DOCf</b>	0,6
<b>Factor de corrección condiciones anaeróbicas</b>	<b>MCF</b>	0,95
<b>Proporción de metano en biogás generado</b>	<b>F</b>	0,5
<b>Cálculo de un menor retardo de la emisión para rechazo de compostaje (exp2)</b>	<b>exp(-k*((13-M)/12))</b>	0,978
<b>Mes en que se impone el comienzo de la reacción, igual al tiempo de retardo promedio + 7 (mes)</b>	<b>M</b>	10
<b>Factor de oxidación</b>	<b>OX</b>	0,1
<b>Factor cobertura final (Arcilla + Geotextil + Gravas)</b>	<b>CF</b>	0,02
<b>Factor Migración de Contorno</b>	<b>MC</b>	0,13

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”





### ANEJO C. HOJA 3. VASO ANTIGUO “MODELO GIA”

	Papel / Cartón						Textiles					
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * (1 - exp1))$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * (1 - exp1))$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t		t	t	t
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1991	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1992												
1993												

	Residuos de alimentos						Madera y similares					
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * (1 - exp1))$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * (1 - exp1))$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t		t	t	t
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1991	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1992												
1993												

	Otros putrescibles orgánicos					
	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	A <sub>L</sub>	B = A + (B <sub>T-1</sub> * exp1)	C = B <sub>T-1</sub> * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F
año	t	t		t	t	t
1989	89372,6	10188,5	10041,3	10041,3	0,0	0,0
1990	107266,2	12228,3	12081,2	21167,0	955,6	637,0
1991	125445,3	14300,8	14153,6	33306,3	2014,3	1342,9
1992		0,0	0,0	30136,7	3169,5	2113,0
1993		0,0	0,0	27268,9	2867,9	1911,9
1994		0,0	0,0	24673,9	2595,0	1730,0
1995		0,0	0,0	22325,9	2348,0	1565,4
1996		0,0	0,0	20201,3	2124,6	1416,4
1997		0,0	0,0	18278,9	1922,4	1281,6
1998		0,0	0,0	16539,4	1739,5	1159,6

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

1999		0,0	0,0	14965,5	1573,9	1049,3
2000		0,0	0,0	13541,3	1424,2	949,4
2001		0,0	0,0	12252,7	1288,6	859,1
2002		0,0	0,0	11086,7	1166,0	777,3
2003		0,0	0,0	10031,7	1055,0	703,4
2004		0,0	0,0	9077,0	954,6	636,4
2005		0,0	0,0	8213,2	863,8	575,9
2006		0,0	0,0	7431,6	781,6	521,1
2007		0,0	0,0	6724,4	707,2	471,5
2008		0,0	0,0	6084,5	639,9	426,6
2009		0,0	0,0	5505,5	579,0	386,0
2010		0,0	0,0	4981,6	523,9	349,3
2011		0,0	0,0	4507,5	474,1	316,0
2012		0,0	0,0	4078,6	428,9	286,0
2013		0,0	0,0	3690,4	388,1	258,8
2014		0,0	0,0	3339,2	351,2	234,1
2015		0,0	0,0	3021,5	317,8	211,8
2016		0,0	0,0	2733,9	287,5	191,7
2017		0,0	0,0	2473,8	260,2	173,4
2018		0,0	0,0	2238,4	235,4	156,9
2019		0,0	0,0	2025,4	213,0	142,0
2020		0,0	0,0	1832,6	192,7	128,5
2021		0,0	0,0	1658,2	174,4	116,3
2022		0,0	0,0	1500,4	157,8	105,2
2023		0,0	0,0	1357,6	142,8	95,2
2024		0,0	0,0	1228,4	129,2	86,1
2025		0,0	0,0	1111,5	116,9	77,9

	Rechazo de compostaje							
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A_L * exp2$	$C = A_L * (1 - exp2)$	$H = B + (H_{last} * year * exp1)$	$E = C + H_{last} * year * (1 - exp1)$	$D = E * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t
1989	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1990	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1991	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1992								

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

1993								
------	--	--	--	--	--	--	--	--

	Lodos EDAR						Otros					
	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * \frac{16}{12} * F$	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * \frac{16}{12} * F$
año	t	t		t	t	t	t	t		t	t	t
1989	1566,4	45,6	44,4	44,4	0,0	0,0	52,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
1990	1880,0	54,7	53,5	90,3	7,5	5,0	62,5	1,2	1,2	2,1	0,0	0,0
1991	2198,6	64,0	62,7	137,8	15,3	10,2	73,0	1,4	1,4	3,5	0,1	0,0
1992				114,6	23,3	15,5				3,4	0,1	0,1
1993				95,2	19,3	12,9				3,3	0,1	0,1
1994				79,1	16,1	10,7				3,2	0,1	0,1
1995				65,8	13,4	8,9				3,1	0,1	0,1
1996				54,7	11,1	7,4				3,0	0,1	0,1
1997				45,4	9,2	6,2				2,9	0,1	0,1
1998				37,8	7,7	5,1				2,8	0,1	0,1
1999				31,4	6,4	4,3				2,7	0,1	0,1
2000				26,1	5,3	3,5				2,6	0,1	0,1
2001				21,7	4,4	2,9				2,6	0,1	0,1
2002				18,0	3,7	2,4				2,5	0,1	0,1
2003				15,0	3,0	2,0				2,4	0,1	0,0
2004				12,4	2,5	1,7				2,3	0,1	0,0
2005				10,3	2,1	1,4				2,3	0,1	0,0
2006				8,6	1,7	1,2				2,2	0,1	0,0
2007				7,1	1,5	1,0				2,1	0,1	0,0
2008				5,9	1,2	0,8				2,1	0,1	0,0
2009				4,9	1,0	0,7				2,0	0,1	0,0
2010				4,1	0,8	0,6				2,0	0,1	0,0
2011				3,4	0,7	0,5				1,9	0,1	0,0
2012				2,8	0,6	0,4				1,8	0,1	0,0
2013				2,4	0,5	0,3				1,8	0,1	0,0

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

<b>2014</b>				2,0	0,4	0,3				1,7	0,1	0,0
<b>2015</b>				1,6	0,3	0,2				1,7	0,1	0,0
<b>2016</b>				1,4	0,3	0,2				1,6	0,0	0,0
<b>2017</b>				1,1	0,2	0,2				1,6	0,0	0,0
<b>2018</b>				0,9	0,2	0,1				1,5	0,0	0,0
<b>2019</b>				0,8	0,2	0,1				1,5	0,0	0,0
<b>2020</b>				0,6	0,1	0,1				1,4	0,0	0,0
<b>2021</b>				0,5	0,1	0,1				1,4	0,0	0,0
<b>2022</b>				0,4	0,1	0,1				1,4	0,0	0,0
<b>2023</b>				0,4	0,1	0,1				1,3	0,0	0,0
<b>2024</b>				0,3	0,1	0,0				1,3	0,0	0,0
<b>2025</b>				0,3	0,1	0,0				1,2	0,0	0,0

## ANEJO D. HOJA 4. VASO 1 “MODELO GIA”

	Papel / Cartón						Textiles					
	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	A <sub>L</sub>	B = A <sub>L</sub> + (B <sub>T-1</sub> * exp1)	C = B <sub>T-1</sub> * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F	W	A = W * DOC * DOCf * MCF	A <sub>L</sub>	B = A <sub>L</sub> + (B <sub>T-1</sub> * exp1)	C = B <sub>T-1</sub> * (1 - exp1)	D = C * 16/12 * F
año	t	t		t	t	t	t	t		t	t	t
1992	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1993	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1994	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1995	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1996	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1997	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1998	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1999	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2004	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2005	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2006	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	66,6	7,6	7,5	7,5	0,0	0,0
2008	2,0	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	172,5	19,7	19,5	26,6	0,4	0,3
2009	7,1	1,3	1,3	1,7	0,0	0,0	51,4	5,9	5,8	30,8	1,5	1,0
2010	6,6	1,2	1,2	2,8	0,1	0,1	24,3	2,8	2,7	31,8	1,8	1,2
2011	10,1	1,9	1,9	4,5	0,2	0,1	18,1	2,1	2,0	32,0	1,8	1,2
2012		0,0		1,8	0,3	0,2		0,0		30,1	1,9	1,2
2013		0,0		0,0	0,1	0,1		0,0		28,3	1,8	1,2
2014		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		26,7	1,7	1,1
2015		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		25,1	1,6	1,0
2016		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		23,7	1,5	1,0
2017		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		22,3	1,4	0,9
2018		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		21,0	1,3	0,9
2019		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		19,8	1,2	0,8
2020		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		18,6	1,2	0,8
2021		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		17,5	1,1	0,7
2022		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		16,5	1,0	0,7
2023		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		15,6	1,0	0,6
2024		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		14,6	0,9	0,6
2025		0,0		0,0	0,0	0,0		0,0		13,8	0,9	0,6

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

	Residuos de alimentos						Madera y similares					
	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t		t	t	t
1992	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1993	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1994	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1995	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1996	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1997	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1998	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1999	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2002	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2004	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2005	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2006	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007	1616,3	161,2	157,0	157,0	0,0	0,0	1586,4	45,2	45,0	45,0	0,0	0,0
2008	4667,3	465,6	451,8	582,2	26,5	17,7	4185,7	119,3	118,7	162,4	1,3	0,9
2009	3380,9	337,2	327,5	811,4	98,3	65,6	4875,8	139,0	138,3	295,9	4,8	3,2
2010	3566,2	355,7	342,9	1017,3	137,0	91,4	4128,4	117,7	117,0	404,1	8,7	5,8
2011	2382,7	237,7	226,0	1071,5	171,8	114,5	7266,4	207,1	205,4	597,6	11,9	8,0
2012		0,0		890,5	181,0	120,6		0,0		580,0	17,7	11,8
2013		0,0		740,1	150,4	100,3		0,0		562,8	17,1	11,4
2014		0,0		615,1	125,0	83,3		0,0		546,2	16,6	11,1
2015		0,0		511,2	103,9	69,3		0,0		530,1	16,1	10,8
2016		0,0		424,9	86,3	57,6		0,0		514,4	15,7	10,4
2017		0,0		353,1	71,8	47,8		0,0		499,2	15,2	10,1
2018		0,0		293,5	59,6	39,8		0,0		484,4	14,8	9,8
2019		0,0		243,9	49,6	33,0		0,0		470,1	14,3	9,5
2020		0,0		202,7	41,2	27,5		0,0		456,2	13,9	9,3
2021		0,0		168,5	34,2	22,8		0,0		442,7	13,5	9,0
2022		0,0		140,0	28,5	19,0		0,0		429,7	13,1	8,7
2023		0,0		116,4	23,6	15,8		0,0		417,0	12,7	8,5
2024		0,0		96,7	19,7	13,1		0,0		404,6	12,3	8,2
2025		0,0		80,4	16,3	10,9		0,0		392,7	12,0	8,0

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

Otros putrescibles orgánicos						
	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$A_L$	$B = A + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t
1992	137628,1	15689,6	15542,4	15542,4	0,0	0,0
1993	137818,5	15711,3	15564,1	29627,5	1479,1	986,0
1994	138579,9	15798,1	15651,0	42459,1	2819,4	1879,6
1995	143529,2	16362,3	16215,2	54633,7	4040,5	2693,7
1996	156854,2	17881,4	17734,2	67168,9	5199,1	3466,1
1997	161708,3	18434,7	18287,6	79064,5	6392,0	4261,3
1998	173224,9	19747,6	19600,5	91141,0	7524,0	5016,0
1999	211581,8	24120,3	23973,2	106440,9	8673,2	5782,1
2000	257541,6	29359,7	29161,2	125473,0	10129,2	6752,8
2001	254158,0	28974,0	28778,7	142311,3	11940,3	7960,2
2002	148649,0	16946,0	16760,8	145529,4	13542,7	9028,5
2003	42838,0	4883,5	4754,6	136435,0	13849,0	9232,6
2004	48297,4	5505,9	5321,2	128772,7	12983,5	8655,7
2005	52481,2	5982,9	5808,2	122326,6	12254,3	8169,6
2006	65419,7	7457,8	7220,3	117906,0	11640,9	7760,6
2007	64780,8	7385,0	7280,4	113966,1	11220,2	7480,2
2008	49367,5	5627,9	5537,7	108658,5	10845,3	7230,2
2009	43223,7	4927,5	4850,7	103169,0	10340,2	6893,5
2010	38636,0	4404,5	4318,7	97669,8	9817,8	6545,2
2011	25938,2	2957,0	2878,7	91254,0	9294,5	6196,3
2012		0,0		82570,1	8684,0	5789,3
2013		0,0		74712,5	7857,6	5238,4
2014		0,0		67602,6	7109,8	4739,9
2015		0,0		61169,4	6433,2	4288,8
2016		0,0		55348,4	5821,0	3880,7
2017		0,0		50081,3	5267,1	3511,4
2018		0,0		45315,4	4765,9	3177,2

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”



2019		0,0		41003,1	4312,3	2874,9
2020		0,0		37101,1	3902,0	2601,3
2021		0,0		33570,5	3530,6	2353,8
2022		0,0		30375,8	3194,7	2129,8
2023		0,0		27485,2	2890,6	1927,1
2024		0,0		24869,6	2615,6	1743,7
2025		0,0		22503,0	2366,7	1577,8

Rechazo de compostaje								
	W	$A = W * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{MCF}$	$A_L$	$B = A_L * \text{exp}2$	$C = A_L * (1 - \text{exp}2)$	$H = B + (\text{Hlast year} * \text{exp}1)$	$E = C + \text{Hlast year} * (1 - \text{exp}1)$	$D = E * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t
1992	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1993	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1994	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1995	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1996	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1997	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1998	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1999	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2002	81144,0	3854,3	3846,6	3672,8	173,9	3672,8	173,9	115,9
2003	190053,0	9027,5	8930,2	8526,5	403,6	11579,0	1023,9	682,6
2004	199664,6	9484,1	9382,4	8958,3	424,1	18581,7	2379,7	1586,5
2005	194465,0	9237,1	9146,2	8732,8	413,4	24176,1	3551,7	2367,8
2006	143738,4	6827,6	6725,1	6421,2	304,0	26514,0	4387,2	2924,8
2007	74670,7	3546,9	3493,5	3335,6	157,9	25371,6	4636,0	3090,7
2008	60536,6	2875,5	2816,3	2689,0	127,3	23775,4	4412,4	2941,6
2009	56617,6	2689,3	2598,7	2481,2	117,5	22241,1	4133,0	2755,3
2010	57213,8	2717,7	2632,5	2513,5	119,0	20998,1	3875,4	2583,6
2011	40209,8	1910,0	1816,5	1734,4	82,1	19186,0	3628,6	2419,1
2012		0,0		0,0	0,0	15945,6	3240,4	2160,3
2013		0,0		0,0	0,0	13252,4	2693,1	1795,4
2014		0,0		0,0	0,0	11014,2	2238,3	1492,2
2015		0,0		0,0	0,0	9153,9	1860,2	1240,2

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

2016		0,0		0,0	0,0	7607,9	1546,1	1030,7
2017		0,0		0,0	0,0	6322,9	1284,9	856,6
2018		0,0		0,0	0,0	5255,0	1067,9	711,9
2019		0,0		0,0	0,0	4367,5	887,5	591,7
2020		0,0		0,0	0,0	3629,8	737,6	491,8
2021		0,0		0,0	0,0	3016,8	613,1	408,7
2022		0,0		0,0	0,0	2507,2	509,5	339,7
2023		0,0		0,0	0,0	2083,8	423,5	282,3
2024		0,0		0,0	0,0	1731,8	351,9	234,6
2025		0,0		0,0	0,0	1439,3	292,5	195,0

Lodos EDAR						
	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t
1992	2412,1	70,2	69,0	69,0	0,0	0,0
1993	2415,4	70,3	69,1	126,4	11,6	7,8
1994	2428,8	70,7	69,4	174,5	21,3	14,2
1995	2515,5	73,2	72,0	217,0	29,5	19,6
1996	2749,1	80,0	78,8	259,1	36,6	24,4
1997	2834,1	82,5	81,2	296,6	43,8	29,2
1998	3036,0	88,3	87,1	333,6	50,1	33,4
1999	3708,2	107,9	106,7	383,9	56,3	37,6
2000	4513,8	131,3	129,7	448,8	64,8	43,2
2001	4454,5	129,6	128,0	500,9	75,8	50,5
2002	6923,0	201,4	197,3	613,7	84,6	56,4
2003	7198,8	209,4	199,2	709,2	103,6	69,1
2004	26712,2	777,2	728,9	1318,4	119,8	79,9
2005	30691,1	892,9	844,7	1940,4	222,7	148,4
2006	33476,0	973,9	916,6	2529,2	327,7	218,5
2007	38044,8	1106,9	1077,9	3179,9	427,2	284,8
2008	32379,9	942,1	914,1	3557,0	537,1	358,1
2009	17239,9	501,6	487,1	3443,3	600,8	400,5
2010	6694,1	194,8	187,7	3049,5	581,6	387,7

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

<b>2011</b>	4638,7	135,0	128,4	2662,8	515,0	343,4
<b>2012</b>		0,0		2213,1	449,7	299,8
<b>2013</b>		0,0		1839,3	373,8	249,2
<b>2014</b>		0,0		1528,6	310,6	207,1
<b>2015</b>		0,0		1270,5	258,2	172,1
<b>2016</b>		0,0		1055,9	214,6	143,0
<b>2017</b>		0,0		877,5	178,3	118,9
<b>2018</b>		0,0		729,3	148,2	98,8
<b>2019</b>		0,0		606,2	123,2	82,1
<b>2020</b>		0,0		503,8	102,4	68,3
<b>2021</b>		0,0		418,7	85,1	56,7
<b>2022</b>		0,0		348,0	70,7	47,1
<b>2023</b>		0,0		289,2	58,8	39,2
<b>2024</b>		0,0		240,4	48,8	32,6
<b>2025</b>		0,0		199,8	40,6	27,1

	Otros					
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A_L + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t
<b>1992</b>	80,1	1,5	1,5	1,5	0,0	0,0
<b>1993</b>	80,3	1,5	1,5	3,0	0,0	0,0
<b>1994</b>	80,7	1,5	1,5	4,4	0,1	0,1
<b>1995</b>	83,6	1,6	1,6	5,9	0,1	0,1
<b>1996</b>	91,3	1,7	1,7	7,4	0,2	0,1
<b>1997</b>	94,2	1,8	1,8	9,0	0,2	0,1
<b>1998</b>	100,9	1,9	1,9	10,7	0,3	0,2
<b>1999</b>	123,2	2,3	2,3	12,7	0,3	0,2
<b>2000</b>	150,0	2,8	2,8	15,1	0,4	0,2
<b>2001</b>	148,0	2,8	2,8	17,5	0,4	0,3
<b>2002</b>	209,0	4,0	4,0	20,9	0,5	0,3
<b>2003</b>	247,0	4,7	4,7	25,0	0,6	0,4
<b>2004</b>	118,9	2,3	2,2	26,5	0,7	0,5
<b>2005</b>	204,4	3,9	3,9	29,5	0,8	0,5
<b>2006</b>	273,1	5,2	5,1	33,8	0,9	0,6
<b>2007</b>	39990,7	759,8	756,6	789,4	1,0	0,7
<b>2008</b>	29739,8	565,1	562,3	1328,4	23,3	15,6

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

<b>2009</b>	26226,7	498,3	496,0	1785,1	39,3	26,2
<b>2010</b>	27393,3	520,5	517,4	2249,8	52,8	35,2
<b>2011</b>	19958,4	379,2	376,2	2559,5	66,5	44,3
<b>2012</b>		0,0		2483,9	75,6	50,4
<b>2013</b>		0,0		2410,5	73,4	48,9
<b>2014</b>		0,0		2339,2	71,2	47,5
<b>2015</b>		0,0		2270,1	69,1	46,1
<b>2016</b>		0,0		2203,0	67,1	44,7
<b>2017</b>		0,0		2137,9	65,1	43,4
<b>2018</b>		0,0		2074,7	63,2	42,1
<b>2019</b>		0,0		2013,4	61,3	40,9
<b>2020</b>		0,0		1953,9	59,5	39,7
<b>2021</b>		0,0		1896,1	57,7	38,5
<b>2022</b>		0,0		1840,1	56,0	37,4
<b>2023</b>		0,0		1785,7	54,4	36,3
<b>2024</b>		0,0		1732,9	52,8	35,2
<b>2025</b>		0,0		1681,7	51,2	34,1

## ANEJO E. HOJA 5. VASO 2 “MODELO GIA”

	Papel / Cartón						Textiles					
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t		t	t	t
2011	2,0	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0	3,6	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
2012	11,3	2,2	2,1	2,5	0,0	0,0	11,8	1,3	1,3	1,7	0,0	0,0
2013	0,0	0,0	0,0	2,4	0,1	0,1	4,9	0,6	0,6	2,2	0,1	0,1
2014	0,0	0,0	0,0	2,2	0,1	0,1	6,7	0,8	0,8	2,8	0,1	0,1
2015	0,0	0,0	0,0	2,1	0,1	0,1	73,9	8,4	8,4	11,0	0,2	0,1
2016	0,0	0,0	0,0	2,0	0,1	0,1	46,0	5,2	5,2	15,6	0,6	0,4
2017	0,0	0,0	0,0	1,9	0,1	0,1	7,8	0,9	0,9	15,6	0,9	0,6
2018	0,0	0,0	0,0	1,7	0,1	0,1	33,5	3,8	3,8	18,5	0,9	0,6
2019	0,0	0,0	0,0	1,6	0,1	0,1	22,2	2,5	2,5	20,0	1,1	0,7
2020	0,0	0,0	0,0	1,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	18,8	1,2	0,8
2021	0,0	0,0	0,0	1,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	17,7	1,1	0,7
2022	0,0	0,0	0,0	1,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	16,7	1,0	0,7
2023	0,0	0,0	0,0	1,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	15,7	1,0	0,6
2024	0,0	0,0	0,0	1,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	14,8	0,9	0,6
2025	0,0	0,0	0,0	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	13,9	0,9	0,6

	Residuos de alimentos						Madera y similares					
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t		t	t	t
2011	476,5	47,5	47,5	47,5	0,0	0,0	1453,3	41,4	41,4	41,4	0,0	0,0
2012	2363,5	235,8	232,2	271,8	8,0	5,4	7687,2	219,1	218,6	258,8	1,2	0,8
2013	1573,3	156,9	152,4	378,2	45,9	30,6	8125,0	231,6	230,5	481,6	7,6	5,1
2014	1404,0	140,0	138,3	452,6	63,9	42,6	8723,2	248,6	248,1	715,4	14,2	9,5
2015	1447,4	144,4	142,9	519,1	76,4	51,0	10036,1	286,0	285,6	979,9	21,1	14,1
2016	1825,7	182,1	181,4	612,8	87,7	58,4	10454,5	298,0	297,8	1248,7	29,0	19,3
2017	1707,5	170,3	169,6	678,9	103,5	69,0	13083,2	372,9	372,6	1584,4	36,9	24,6
2018	1717,1	171,3	169,5	733,8	114,7	76,4	15542,3	443,0	442,2	1979,8	46,8	31,2
2019	1724,2	172,0	170,3	780,1	123,9	82,6	21058,1	600,2	599,2	2520,4	58,5	39,0
2020	0,0	0,0	0,0	648,3	131,8	87,8	0,0	0,0	0,0	2445,9	74,5	49,7
2021	0,0	0,0	0,0	538,8	109,5	73,0	0,0	0,0	0,0	2373,6	72,3	48,2
2022	0,0	0,0	0,0	447,8	91,0	60,7	0,0	0,0	0,0	2303,5	70,2	46,8
2023	0,0	0,0	0,0	372,2	75,6	50,4	0,0	0,0	0,0	2235,4	68,1	45,4

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

2024	0,0	0,0	0,0	309,3	62,9	41,9	0,0	0,0	0,0	2169,4	66,1	44,0
2025	0,0	0,0	0,0	257,1	52,2	34,8	0,0	0,0	0,0	2105,2	64,1	42,7

Otros putrescibles orgánicos						
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t
2011	5187,6	591,4	591,4	591,4	0,0	0,0
2012	23943,9	2729,6	2707,6	3242,7	56,3	37,5
2013	25515,8	2908,8	2863,1	5797,2	308,6	205,7
2014	21911,8	2497,9	2481,0	7726,5	551,7	367,8
2015	24913,7	2840,2	2824,4	9815,7	735,3	490,2
2016	111411,6	12700,9	12673,4	21555,0	934,1	622,7
2017	101914,2	11618,2	11591,3	31095,1	2051,2	1367,5
2018	33814,4	3854,8	3833,7	31969,6	2959,1	1972,7
2019	46967,8	5354,3	5325,2	34252,5	3042,3	2028,2
2020	0,0	0,0	0,0	30992,9	3259,6	2173,0
2021	0,0	0,0	0,0	28043,6	2949,4	1966,2
2022	0,0	0,0	0,0	25374,9	2668,7	1779,1
2023	0,0	0,0	0,0	22960,1	2414,7	1609,8
2024	0,0	0,0	0,0	20775,2	2184,9	1456,6
2025	0,0	0,0	0,0	18798,2	1977,0	1318,0

Rechazo de compostaje								
	W	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$A_L$	$B = A * exp2$	$C = A * (1 - exp2)$	$H = B + (H_{last\ year} * exp1)$	$E = C + (H_{last\ year} * (1 - exp1))$	$D = E * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t
2011	8042,0	382,0	382,0	364,7	17,3	364,7	17,3	11,5
2012	41949,7	1992,6	1962,9	1874,2	90,1	2177,3	151,7	101,1
2013	34492,0	1638,4	1590,7	1518,8	74,0	3328,4	441,8	294,5
2014	35445,1	1683,6	1662,5	1587,3	76,1	4353,6	638,2	425,5
2015	36605,2	1738,7	1720,9	1643,1	78,6	5261,4	813,9	542,6
2016	42837,8	2034,8	2026,7	1935,1	92,0	6307,8	980,6	653,7
2017	42053,5	1997,5	1989,0	1899,1	90,3	7141,6	1155,7	770,4
2018	66171,3	3143,1	3111,2	2970,6	142,1	8905,9	1348,2	898,8
2019	49743,8	2362,8	2339,0	2233,3	106,8	9635,1	1611,0	1074,0
2020	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8007,8	1627,3	1084,9

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

2021	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6655,3	1352,5	901,7
2022	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5531,2	1124,0	749,4
2023	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4597,0	934,2	622,8
2024	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3820,6	776,4	517,6
2025	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3175,3	645,3	430,2

	Lodos EDAR						Otros					
	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$A_L$	$B = A + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$	W	$A = W * DOC * DOC_f * MCF$	$A_L$	$B = A + (B_{T-1} * exp1)$	$C = B_{T-1} * (1 - exp1)$	$D = C * 16/12 * F$
año	t	t		t	t	t	t	t	t	t	t	t
2011	927,7	27,0	27,0	27,0	0,0	0,0	3991,7	75,8	75,8	75,8	0,0	0,0
2012	5028,8	146,3	144,1	166,6	4,6	3,0	23098,1	438,9	437,8	511,4	2,2	1,5
2013	3157,8	91,9	89,2	227,6	28,1	18,8	18611,7	353,6	352,0	848,2	15,1	10,1
2014	3067,4	89,2	88,1	277,3	38,4	25,6	21485,1	408,2	407,4	1230,6	25,1	16,7
2015	3177,9	92,5	91,5	322,0	46,8	31,2	19428,4	369,1	368,5	1562,7	36,4	24,2
2016	2728,9	79,4	79,1	346,7	54,4	36,3	19429,0	369,2	368,9	1885,4	46,2	30,8
2017	2684,5	78,1	77,8	365,9	58,6	39,0	18984,9	360,7	360,5	2190,2	55,7	37,1
2018	2366,0	68,8	68,1	372,2	61,8	41,2	17242,1	327,6	327,1	2452,5	64,7	43,2
2019	2058,2	59,9	59,3	368,6	62,9	41,9	19131,7	363,5	362,9	2742,9	72,5	48,3
2020	0,0	0,0	0,0	306,4	62,3	41,5	0,0	0,0	0,0	2661,9	81,1	54,0
2021	0,0	0,0	0,0	254,6	51,7	34,5	0,0	0,0	0,0	2583,2	78,7	52,4
2022	0,0	0,0	0,0	211,6	43,0	28,7	0,0	0,0	0,0	2506,9	76,3	50,9
2023	0,0	0,0	0,0	175,9	35,7	23,8	0,0	0,0	0,0	2432,8	74,1	49,4
2024	0,0	0,0	0,0	146,2	29,7	19,8	0,0	0,0	0,0	2360,9	71,9	47,9
2025	0,0	0,0	0,0	121,5	24,7	16,5	0,0	0,0	0,0	2291,1	69,8	46,5

## ANEJO F. HOJA 7. LIXIVIADO “MODELO GIA”

					Papel/Cartón			
	Lixiviados (m3/año)	DQO (mg/L)	TOC (mg/L)	Carbono en lixiviado (Toneladas)	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$Lo=A*k$	%	Carbono en Lixiviado
1989	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1990	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1991	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1992	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1993	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1994	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1995	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1996	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1997	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1998	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
1999	118181,8	3348		148,38	0,000	0,000	0,000	0,000
2000	118181,8	4516		200,14	0,000	0,000	0,000	0,000
2001	118181,8		1666,75	196,98	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	118181,8		1666,75	196,98	0,000	0,000	0,000	0,000
2003	141961,3		1666,75	236,61	0,000	0,000	0,000	0,000
2004	200771,3		1666,75	334,64	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	188251,8		1666,75	313,77	0,000	0,000	0,000	0,000
2006	187545,96		2119	397,41	0,000	0,000	0,000	0,000
2007	187545,96		1038	194,67	0,000	0,000	0,000	0,000
2008	187545,96		1038	194,67	0,372	0,022	0,002	0,004
2009	187545,96		1038	194,67	1,345	0,081	0,006	0,013
2010	187545,96		1038	194,67	1,246	0,075	0,007	0,015
2011	187545,96		1038	194,67	2,310	0,139	0,016	0,031
2012	56815,37		1038	58,97	2,151	0,129	0,018	0,010
2013	56815,37		1820	103,40	0,000	0,000	0,000	0,000
2014	56815,37		746	42,38	0,000	0,000	0,000	0,000
2015	56815,37		653	37,10	0,000	0,000	0,000	0,000
2016	56815,37		653	37,10	0,000	0,000	0,000	0,000
2017	56815,37		653	37,10	0,000	0,000	0,000	0,000
2018	87079,09		653	56,86	0,000	0,000	0,000	0,000
2019	87079,09		653	56,8626458	0,000	0,000	0,000	0,000

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”



	Textiles				Residuos Alimenticios			
	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$Lo=A*k$	%	Carbono en Lixiviado	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$Lo=A*k$	%	Carbono en Lixiviado
1989	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1990	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1991	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1992	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1993	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1994	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1995	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1996	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1997	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1998	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1999	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2007	7,594	0,456	0,033	0,065	161,221	29,826	2,171	4,225
2008	19,664	1,180	0,097	0,189	465,559	86,128	7,092	13,806
2009	5,862	0,352	0,028	0,055	337,249	62,391	4,995	9,725
2010	2,768	0,166	0,017	0,032	355,730	65,810	6,589	12,827
2011	2,481	0,149	0,017	0,033	285,213	52,764	5,976	11,633
2012	1,343	0,081	0,011	0,006	235,759	43,615	5,957	3,513
2013	0,559	0,034	0,005	0,005	156,935	29,033	4,415	4,565
2014	0,759	0,046	0,007	0,003	140,047	25,909	4,156	1,761
2015	8,427	0,506	0,076	0,028	144,378	26,710	3,989	1,480
2016	5,246	0,315	0,018	0,007	182,114	33,691	1,964	0,729
2017	0,885	0,053	0,003	0,001	170,327	31,511	1,970	0,731
2018	3,821	0,229	0,022	0,013	171,285	31,688	3,062	1,741
2019	2,531	0,152	0,016	0,009	171,989	31,818	3,046	1,732

	Madera y similares				Otros putrescibles orgánicos			
	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$Lo=A*k$	%	Carbono en Lixiviado	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$Lo=A*k$	%	Carbono en Lixiviado
1989	0,000	0,000	0,000	0,000	10188,478	1018,848	99,176	147,155
1990	0,000	0,000	0,000	0,000	12228,343	1222,834	99,176	147,155
1991	0,000	0,000	0,000	0,000	14300,760	1430,076	99,176	147,155
1992	0,000	0,000	0,000	0,000	15689,604	1568,960	99,176	147,155
1993	0,000	0,000	0,000	0,000	15711,305	1571,131	99,176	147,155
1994	0,000	0,000	0,000	0,000	15798,108	1579,811	99,176	147,155
1995	0,000	0,000	0,000	0,000	16362,326	1636,233	99,176	147,155
1996	0,000	0,000	0,000	0,000	17881,375	1788,137	99,176	147,155
1997	0,000	0,000	0,000	0,000	18434,743	1843,474	99,176	147,155
1998	0,000	0,000	0,000	0,000	19747,635	1974,763	99,176	147,155
1999	0,000	0,000	0,000	0,000	24120,325	2412,033	99,176	147,155
2000	0,000	0,000	0,000	0,000	29359,742	2935,974	99,176	198,493
2001	0,000	0,000	0,000	0,000	28974,012	2897,401	99,176	195,357
2002	0,000	0,000	0,000	0,000	16945,986	1694,599	94,006	185,173
2003	0,000	0,000	0,000	0,000	4883,532	488,353	54,511	128,982
2004	0,000	0,000	0,000	0,000	5505,899	550,590	55,195	184,703
2005	0,000	0,000	0,000	0,000	5982,857	598,286	55,651	174,616
2006	0,000	0,000	0,000	0,000	7457,842	745,784	59,769	237,526
2007	45,213	1,356	0,099	0,192	7385,010	738,501	53,743	104,622
2008	119,292	3,579	0,295	0,574	5627,889	562,789	46,340	90,212
2009	138,959	4,169	0,334	0,650	4927,504	492,750	39,453	76,804
2010	117,660	3,530	0,353	0,688	4404,507	440,451	44,098	85,847
2011	248,509	7,455	0,844	1,644	3548,347	354,835	40,187	78,232
2012	219,086	6,573	0,898	0,529	2729,607	272,961	37,278	21,985
2013	231,561	6,947	1,056	1,092	2908,799	290,880	44,234	45,739
2014	248,612	7,458	1,196	0,507	2497,947	249,795	40,067	16,982
2015	286,028	8,581	1,281	0,475	2840,166	284,017	42,412	15,735
2016	297,953	8,939	0,521	0,193	12700,919	1270,092	74,048	27,472
2017	372,871	11,186	0,699	0,259	11618,219	1161,822	72,642	26,950
2018	442,955	13,289	1,284	0,730	3854,846	385,485	37,254	21,184
2019	600,157	18,005	1,724	0,980	5354,329	535,433	51,261	29,149

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

	Rechazo Compostaje				Lodos EDAR			
	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$Lo=A*k$	%	Carbono en Lixiviado	$A = W * DOC * DOCf * MCF$	$Lo=A*k$	%	Carbono en Lixiviado
1989	0,000	0,000	0,000	0,000	45,572	8,431	0,821	1,22
1990	0,000	0,000	0,000	0,000	54,696	10,119	0,821	1,22
1991	0,000	0,000	0,000	0,000	63,965	11,834	0,821	1,22
1992	0,000	0,000	0,000	0,000	70,177	12,983	0,821	1,22
1993	0,000	0,000	0,000	0,000	70,274	13,001	0,821	1,22
1994	0,000	0,000	0,000	0,000	70,663	13,073	0,821	1,22
1995	0,000	0,000	0,000	0,000	73,186	13,539	0,821	1,22
1996	0,000	0,000	0,000	0,000	79,981	14,796	0,821	1,22
1997	0,000	0,000	0,000	0,000	82,456	15,254	0,821	1,22
1998	0,000	0,000	0,000	0,000	88,328	16,341	0,821	1,22
1999	0,000	0,000	0,000	0,000	107,887	19,959	0,821	1,22
2000	0,000	0,000	0,000	0,000	131,322	24,295	0,821	1,64
2001	0,000	0,000	0,000	0,000	129,597	23,975	0,821	1,62
2002	381,993	70,669	3,920	7,722	201,416	37,262	2,067	4,07
2003	1992,613	368,633	41,148	97,362	209,440	38,746	4,325	10,23
2004	1638,371	303,099	30,385	101,679	777,158	143,774	14,413	48,23
2005	1683,644	311,474	28,973	90,907	892,920	165,190	15,366	48,21
2006	1738,748	321,668	25,779	102,449	973,942	180,179	14,440	57,39
2007	2034,794	376,437	27,394	53,329	1106,867	204,770	14,902	29,01
2008	1997,541	369,545	30,428	59,236	942,054	174,280	14,350	27,94
2009	3143,139	581,481	46,557	90,634	501,574	92,791	7,429	14,46
2010	2362,831	437,124	43,765	85,198	194,756	36,030	3,607	7,02
2011	2291,959	424,012	48,021	93,484	161,950	29,961	3,393	6,61
2012	1992,613	368,633	50,344	29,690	146,305	27,067	3,696	2,18
2013	1638,371	303,099	46,092	47,661	91,871	16,996	2,585	2,67
2014	1683,644	311,474	49,961	21,175	89,243	16,510	2,648	1,12
2015	1738,748	321,668	48,035	17,821	92,456	17,104	2,554	0,95
2016	2034,794	376,437	21,947	8,142	79,393	14,688	0,856	0,32

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

2017	1997,541	369,545	23,105	8,572	78,103	14,449	0,903	0,34
2018	3143,139	581,481	56,196	31,955	68,835	12,734	1,231	0,70
2019	2362,831	437,124	41,849	23,797	59,882	11,078	1,061	0,60

	Otros			
	A = W * DOC * DOCf * MCF	Lo=A*k	%	Carbono en Lixiviado
1989	0,99	0,03	0,00	0,00
1990	1,19	0,04	0,00	0,00
1991	1,39	0,04	0,00	0,00
1992	1,52	0,05	0,00	0,00
1993	1,52	0,05	0,00	0,00
1994	1,53	0,05	0,00	0,00
1995	1,59	0,05	0,00	0,00
1996	1,74	0,05	0,00	0,00
1997	1,79	0,05	0,00	0,00
1998	1,92	0,06	0,00	0,00
1999	2,34	0,07	0,00	0,00
2000	2,85	0,09	0,00	0,01
2001	2,81	0,08	0,00	0,01
2002	3,97	0,12	0,01	0,01
2003	4,69	0,14	0,02	0,04
2004	2,26	0,07	0,01	0,02
2005	3,88	0,12	0,01	0,03
2006	5,19	0,16	0,01	0,05
2007	759,82	22,79	1,66	3,23
2008	565,06	16,95	1,40	2,72
2009	498,31	14,95	1,20	2,33
2010	520,47	15,61	1,56	3,04
2011	455,05	13,65	1,55	3,01
2012	438,86	13,17	1,80	1,06
2013	353,62	10,61	1,61	1,67

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG "Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero"

2014	408,22	12,25	1,96	0,83
2015	369,14	11,07	1,65	0,61
2016	369,15	11,07	0,65	0,24
2017	360,71	10,82	0,68	0,25
2018	327,60	9,83	0,95	0,54
2019	363,50	10,91	1,04	0,59

**ANEJO G. PUNTOS DE LA QUINTA CAMPAÑA DE MEDIDA DE EMISIONES DIFUSAS EN EL VERTEDERO**

pos_x	pos_y	value	group
534,533	316,650	0,012	E1
525,276	246,082	0,001	E2
527,424	207,638	0,180	E3
532,752	150,180	0,205	E4
486,488	332,550	0,003	E5
479,578	273,070	0,000	E6
487,279	230,366	0,209	E7
488,098	176,272	0,138	E8
475,393	154,597	0,002	E9
445,018	151,709	1,039	E10
459,097	184,259	0,029	E11
452,412	233,064	0,020	E12
450,073	289,612	0,000	E13
456,678	340,542	0,137	E14
459,763	386,055	0,045	E15
411,619	443,716	0,026	E16
409,605	400,749	0,047	E17
404,971	342,697	0,005	E18
407,909	301,693	0,065	E19
413,635	254,561	0,127	E20
410,086	200,943	0,005	E21
373,973	210,537	0,008	E22
366,090	283,563	0,000	E23
360,958	323,361	0,217	E24
351,673	370,742	0,110	E25
345,466	429,429	0,026	E26
349,748	461,495	0,000	E27
303,195	448,953	0,000	E28
313,309	415,337	0,965	E29
308,178	366,840	0,202	E30

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un vertedero”

321,212	322,986	3,443	E31
318,317	281,470	0,055	E32
319,610	248,030	0,930	E33
284,835	263,279	0,000	E34
299,830	321,255	0,000	E35
293,503	363,616	0,000	E36
280,103	412,693	0,186	E37
276,100	473,807	0,000	E38
248,537	468,012	0,000	E39
249,440	425,691	0,000	E40
250,023	383,815	0,014	E41
262,931	333,853	0,120	E42
240,952	305,916	0,069	E43
208,417	284,498	0,009	E44
191,762	232,087	0,036	E45
168,705	288,788	0,006	E46
115,737	262,633	0,004	E47
107,522	235,261	0,095	E48
50,584	252,673	0,002	E49
66,447	296,315	0,005	E50
96,556	339,963	0,250	E51
141,868	348,737	0,011	E52
112,396	391,491	0,000	E53
143,929	452,788	0,003	E54
186,936	478,460	0,000	E55
218,481	453,350	0,000	E56
163,717	535,051	0,000	VA1
113,158	539,088	0,000	VA2
124,873	470,143	0,024	VA3
122,604	469,715	1,135	VA4
92,734	447,500	0,000	VA5
309,296	210,233	0,000	G1
442,099	84,648	0,015	G2
524,364	98,930	0,002	G3

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
TFG “Modelo para la estimación de emisiones difusas de gas en un  
vertedero”

574,059	297,814	0,000	C1
574,573	224,065	0,000	C2
652,749	221,829	0,000	C3
649,921	189,086	0,000	C4